

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Ověření parametrů asynchronního motoru s hybridním rotorem
Validation of Output Parameters of Asynchronous Motor with Hybrid
Rotor Design

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Pavel Motáš**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Ověření parametrů asynchronního motoru s hybridním rotorem**
Validation of Output Parameters of Asynchronous Motor with Hybrid Rotor Design

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Základní princip činnosti as. motoru, konstrukce
3. Rozbor vlastností hybridních rotorů, specifika, provedení
4. Proveďte typovou zkoušku as. motoru s hybridním rotorem
5. Měření vyhodnoťte a výsledky porovnejte se standardní konstrukcí rotoru
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- KOPYLOV, Igor, Petrovič. Stavba elektrických strojů, 1988, Praha, SNTL/MIR
- CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů, Praha, 1958, SNTL
- KAČOR, Petr. Vybrané typy elektrických strojů, Ostrava, 2010, VŠB-TU Ostrava
- Katalogy a katalogové listy
- Odborné a technické www stránky
- Technické normy

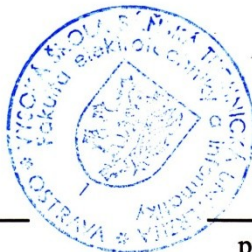
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava.

V Mohelnici dne 29. 04. 2015



Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování práce věnoval. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Miloši Pěničkovi a firmě Siemens, s.r.o., odštěpný závod Elektromotory Mohelnice za možnost spolupráce na dané problematice. Na závěr bych chtěl poděkovat panu Ing. Davidu Bolcekovi za odbornou pomoc, cenné rady, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování práce věnoval.



V Ostravě dne 7.5.2015

Podpis

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá ověřením parametrů asynchronního motoru s hybridním rotorem. V první části práce je popsána konstrukce a princip činnosti asynchronního stroje. Na tu navazuje část, která zdůvodňuje použití motorů s hybridním rotorem. Zde jsou také uvedeny vlastnosti a specifikace provedení hybridních rotorů. Na hybridním rotoru byla provedena změna vnitřní konstrukce a pro tuto změnu bylo vyrobeno pět prototypů elektromotorů. Hlavní částí práce bylo provést měření na asynchronním motoru. Jsou zde uvedeny jednotlivé zkoušky asynchronního motoru s upravenou vnitřní konstrukcí hybridního rotoru. V poslední části je uvedeno vyhodnocení jednotlivých měření, kde jsou změřené hodnoty porovnány se standardním provedením hybridního motoru. Aby byl patrný rozdíl mezi motorem se standardním rotorem, a motorem s hybridním rotorem, je taktéž provedeno srovnání jejich naměřených hodnot.

Klíčová slova

Asynchronní motor, konstrukce, princip činnosti, hybridní rotor, měření naprázdno, měření nakrátko, účinnost elektromotoru, mechanická kontrola, odpor vinutí, zatěžovací charakteristiky, měření teploty, moment, momentová charakteristika, měření hluku, měření vibrací.

Abstract

The thesis deals with the verification of the parameters of asynchronous motor with hybrid rotor. In the first part of the thesis describes the design and principle of operation of asynchronous machines. Next is listed the part that justifies the use of engines with hybrid rotor. Here are also listed properties and specifications of the implementation of the hybrid of rotors. On a hybrid rotor change was made to the internal structure and for this change, has been produced five prototypes of electric motors. The main parts of the work, was to make measurements on asynchronous motor. Here are listed the individual tests an asynchronous engine with a modified the internal structure of a hybrid rotor. In the last parts of the thesis is listed evaluation of individual measurements, where the measured values are compared with the standard constructions of a hybrid motor. In order to be seen difference between the motor with standard rotor and motor with hybrid rotor was also performed the comparison of their measured values.

Key Words

Asynchronous motor, constructions, principle of operation, hybrid rotor, no-load test, short circuit test, motor efficiency, mechanical control, winding resistance, load characteristics, temperature test, torque, torque characteristic, noise test, vibration test.

Seznam použitých symbolů a zkratek

3f	třífázové	
l	odkaz na poznámku pod čarou	
°	stupeň	
°C	stupeň celsia	
①	varianta napájení	
②	varianta napájení	
③	varianta napájení	
A	ampér	
a_{eff}	zrychlení	m/s^2
atd.	a tak dále	
B	magnetická indukce	T
CO ₂	oxid uhličitý	
cosφ	účinník	
cosφ _A	účinník nakrátko	
cosφ _N	jmenovitý účinník	
ČSN	označení české technické normy	
D	zapojení elektromotoru do trojúhelníku	
dm	decimetr	m^{-1}
E	elektromotorická síla	V
EFF1	vysoká účinnost	
EFF2	standardní účinnost	
EN	označení evropské normy	
EU	Evropská unie	
f	frekvence	Hz
F _m	magnetomotorické napětí	A
G _m	magnetická vodivost	H
Hz	hertz	
I	proud	A
I _A	Proud nakrátko	A
IC	označení druhu chlazení	
IE1	standardní účinnost	
IE2	zvýšená účinnost	
IE3	vysoká účinnost	
IE4	velmi vysoká účinnost	
IEC	mezinárodní elektrotechnická komise	
I _m	magnetizační proud	A
I _N	jmenovitý proud	A
IP(X)	stupeň krytí	
I _Z	záběrný proud	A
K	kelvin	
kg	kilogram	
kV	kilovolt	10^3 V
k _v	činitel vinutí	
kW	kilowatt	10^3 W
L	indukčnost	H

L_{pf}	hladina akustického tlaku	dB
$L_{pf,celk}$	celková hladina akustického tlaku	dB
L_W	hladina akustického výkonu	dB
$L_{W,celk}$	celková hladina akustického výkonu	dB
mm	milimetr	10^{-3} m
mm ²	milimetr čtverečný	10^{-6} m ²
M_{max}	maximální moment/moment zvratu	Nm
mmn	magnetomotorické napětí	
MOT_1	označení upraveného hybridního rotoru	
MOT_2	označení upraveného hybridního rotoru	
MOT_3	označení upraveného hybridního rotoru	
MOT_4	označení upraveného hybridního rotoru	
MOT_5	označení upraveného hybridního rotoru	
M_Z	záběrný moment	Nm
n	otáčky	min ⁻¹
N	počet závitů	
např.	například	
n_s	synchronní otáčky	min ⁻¹
obr.	obrázek	
p	převod	
p	počet pólpárů	
p	hodnota akustického tlaku	Pa
P_1	příkon/příkon naprázdno	W
P_2	výkon	W
P_A	příkon nakrátko	
P_{el}	elektrický výkon	W
P_{LL}	rozptylové ztráty	W
P_{mech}	mechanický výkon	W
P_r	ztráty ve vinutí rotoru	W
P_S	ztráty ve vinutí statoru	W
P_T	celkové ztráty	W
P_δ	výkon vzduchové mezery	W
R	činný odpor	Ω
R_{20}	činný odpor při 20 °C	Ω
s	skluz	%
S	plocha	m ²
s_{eff}	výchylka	μ m
t	čas	s
T	moment	Nm
T_1	záběrný moment	Nm
T_A	moment nakrátko	Nm
tab.	tabulka	
T_{IN1}	naměřený vnitřní záběrný moment	Nm
tj.	to je, to jest	
T_{ININ}	naměřený vnitřní záběrný moment při jmenovitém napětí	Nm
U	napětí	V
U_i	indukované napětí	V
U_K	napětí nakrátko	%
U_m	magnetomotorické napětí	A

U_N	jmenovité napětí	V
V	volt	
v	akustická rychlost	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
v_{eff}	rychlost	$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
W	akustický výkon	W
W_0	hledaný akustický výkon	W
X	reaktance	Ω
Y	zapojení elektromotoru do hvězdy	
ZS	zadní strana	
ΔP_0	ztráty naprázdno	W
ΔP_{Cu}	ztráty v mědi	W
ΔP_d	přídavné ztráty	W
ΔP_{Fe}	ztráty v železe	W
ΔP_{fw}	mechanické ztráty	W
ΔP_s	ztráty ve statorovém vinutí	W
$\Delta \Theta$	oteplení	K
η	účinnost	%
ϑ	teplota vinutí při měření	$^{\circ}\text{C}$
Θ_s	teplota vinutí	$^{\circ}\text{C}$
μm	mikrometr	10^{-6}m
τ	časová konstanta	
ϕ	magnetický tok	Wb
ω	elektrická úhlová rychlost	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
Ω	mechanická úhlová rychlost	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$

Obsah

Úvod	1
1 Asynchronní stroj	2
1.1 Názvosloví.....	2
1.2 Historie	2
1.3 Základní popis	2
1.4 Konstrukce	3
1.4.1 Hřídele.....	4
1.4.2 Ložiska a ložiskové štíty.....	4
1.4.3 Magnetický obvod statoru	5
1.4.4 Magnetický obvod rotoru.....	6
1.4.5 Statorové vinutí	7
1.4.6 Rotorové vinutí	11
1.4.7 Štítek asynchronního stroje	15
1.5 Princip činnosti asynchronního motoru	16
1.5.1 Funkce a pracovní stavy	22
1.5.2 Energetická bilance asynchronního stroje.....	24
1.5.3 Moment a momentová charakteristika	26
2 Hybridní rotory asynchronních motorů s kotvou nakrátko.....	29
2.1 Směrnice EU 2009/125/ES a norma ČSN EN (IEC) 60034 - 30	29
2.2 Provedení hybridních rotorů	30
2.3 Vlastnosti motorů s hybridním rotorem.....	31
2.4 Změna vnitřní konstrukce hybridního rotoru	32
3 Měření asynchronního motoru	35
3.1 Základní mechanická kontrola	36
3.2 Měření činného odporu vinutí.....	37
3.3 Měření naprázdno.....	40
3.4 Měření nakrátko	43
3.5 Měření zatěžovacích charakteristik	46
3.6 Rozběhové zkoušky	50
3.7 Oteplovací zkouška	56
3.8 Měření hluku.....	59
3.9 Měření vibrací.....	65
3.10 Stanovení účinnosti elektromotoru	67
3.11 Přehled použitých měřících přístrojů	68
4 Vyhodnocení a porovnání naměřených hodnot	69
4.1 Srovnání elektromotoru s měděným a hybridním rotorem	69
4.2 Srovnání prototypů s hybridním elektromotorem.....	70

4.2.1	<i>Porovnání hodnot při 400V/50Hz/11kW</i>	71
4.2.2	<i>Porovnání hodnot při 400V/60Hz/11kW</i>	72
4.2.3	<i>Porovnání hodnot při 400V/60Hz/12,6kW</i>	73
4.2.4	<i>Shrnutí získaných poznatků</i>	74
5	Závěr	75
6	Seznam použité literatury	76
7	Seznam obrázků a tabulek	78
8	Seznam příloh	82
8.1	Tištěné	82
8.2	Elektronické	82

Úvod

Zvyšování cen energií klade stále větší důraz na sledování energetické spotřeby pohonných systémů. Je také velice důležité využít všech možností k její minimalizaci. Snížení spotřeby elektrické energie má také nezanedbatelný vliv na životní prostředí. Za jeden z největších spotřebičů energií na světě je považován asynchronní elektromotor. Proto se tato práce zabývá ověřováním parametrů asynchronních elektromotorů.

Nedílnou součástí práce je popis konstrukce asynchronního elektromotoru a jeho princip činnosti. Protože v dnešní době přestává tato konstrukce splňovat požadavky na spotřebu elektrické energie, tak mnoho výrobců asynchronních elektromotorů přešlo k vývoji nových řad elektromotorů. Firma Siemens, s.r.o., odštěpný závod Elektromotory Mohelnice vyrábí elektromotory s tzv. hybridním rotorem. Specifika provedení, vlastnosti a úpravy hybridního rotoru jsou uvedeny před kapitolou, ve které je popsán průběh jednotlivých zkoušek. Ty byly stejným způsobem provedeny na všech prototypch upraveného hybridního elektromotoru.

Ve výsledcích jsou porovnány změřené hodnoty asynchronního elektromotoru s hybridním rotorem a asynchronního elektromotoru s měděným rotorem. Dále jsou uvedeny jednotlivé naměřené hodnoty u motorů s upravenými hybridními rotory. Ty jsou porovnány s naměřenými hodnotami elektromotoru s neupraveným hybridním rotorem. Na závěr je uvedeno vyhodnocení jednotlivých prototypů a jejich možné využití do budoucnosti.

1 Asynchronní stroj

Asynchronní stroj je díky své jednoduché konstrukci, nenáročnosti na údržbu, provozní spolehlivosti a pořizovací ceně nejvyužívanějším typem elektrického stroje na světě. Jeho vnější konstrukci je možné uzpůsobit tak, aby s poháněným zařízením tvořil kompaktní celek. [1, s. 54]

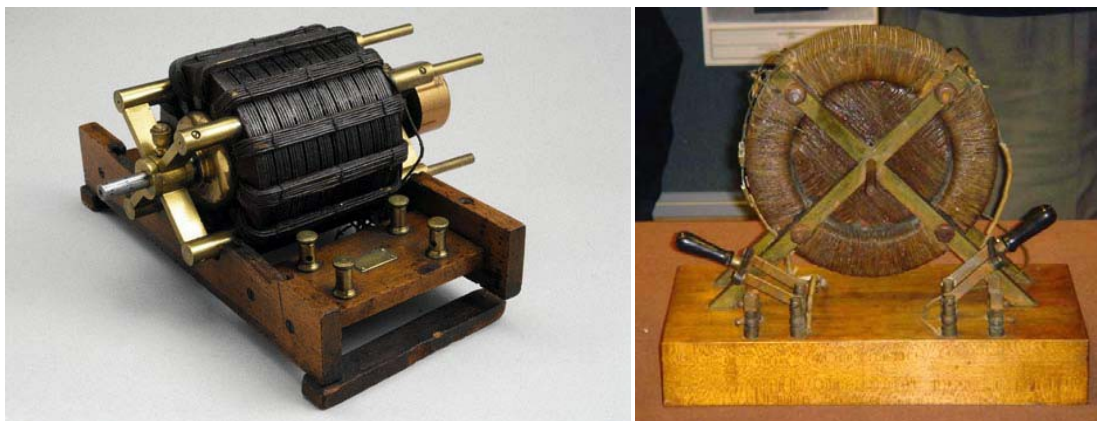
1.1 Názvosloví

Indukční stroj je elektrický točivý stroj, jehož princip je založen na indukci napětí a proudu v rotoru. U nás se používá název asynchronní stroj, protože rotor se neotáčí synchronně s točivým polem statoru. [2, s. 7]

Asynchronní stroj je střídavý elektrický stroj, u něhož poměr otáček při zatížení a kmitočtu napájecí soustavy, ke které je připojen, není konstantní. [2, s. 7]

1.2 Historie

V historii a technické literatuře nalezneme několik autorů, kteří popsali základní princip asynchronního stroje. Nikola Tesla před více než 120 lety nechal patentovat asynchronní stroj, díky jehož konstrukčnímu provedení bylo možno asynchronní stroj využít jako průmyslově vyráběnou pohonnou jednotku. Podle jeho vzoru se asynchronní stroje vyrábějí dodnes. [1, s. 54], [2, s. 9]



obr. 1.1 Konstrukce dvoufázového asynchronního motoru podle N. Tesly
[1, s. 54]

1.3 Základní popis

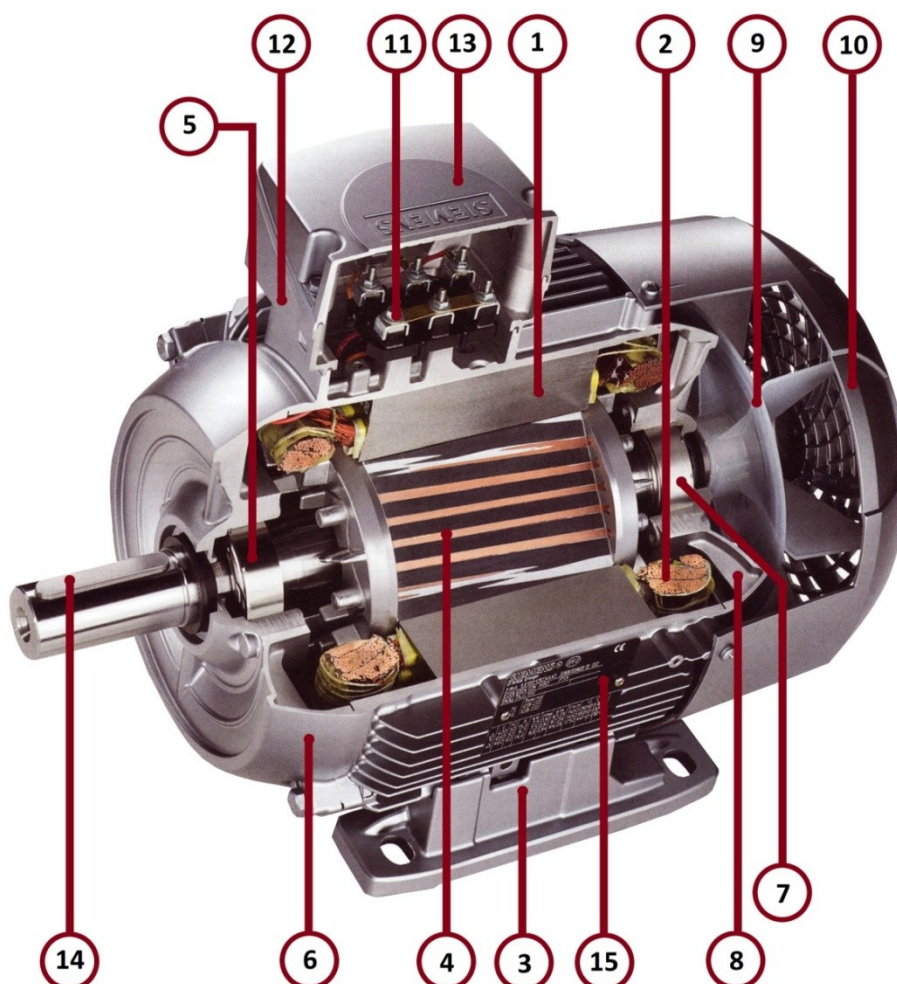
Asynchronní stroj je točivý elektrický stroj, jehož magnetický obvod je rozdělen malou vzduchovou mezerou na dvě části. Tyto části jsou stator a rotor. Obě části jsou opatřeny vinutím, které je uloženo v drážkách. Jedno z vinutí, nejčastěji statorové, je připojeno na zdroj

střídavého proudu. Druhé vinutí je spojeno nakrátko a proud v něm vzniká elektromagnetickou indukcí, z toho název indukční stroj. Nejčastějším provedením je třífázový asynchronní motor s patkami a ložiskovými štíty.

1.4 Konstrukce

Pro seznámení jsou na obr. 1.2 zobrazeny základní konstrukční části asynchronního stroje.

1 – magnetický obvod statoru, 2 – 3f vinutí statoru, 3 – kostra motoru, 4 – magnetický obvod rotoru s klecí nakrátko nalisovanou na hřídeli, 5 – zadní ložisko, 6 – zadní ložiskový štít, 7 – přední ložisko, 8 – přední ložiskový štít, 9 – ventilátor, 10 – kryt ventilátoru, 11 – svorkovnice, 12 – kryt svorkovnice, 13 – víko svorkovnice, 14 – klín pro volný konec hřídele, 15 – štítek.



obr. 1.2 Základní konstrukční části asynchronního stroje [5]

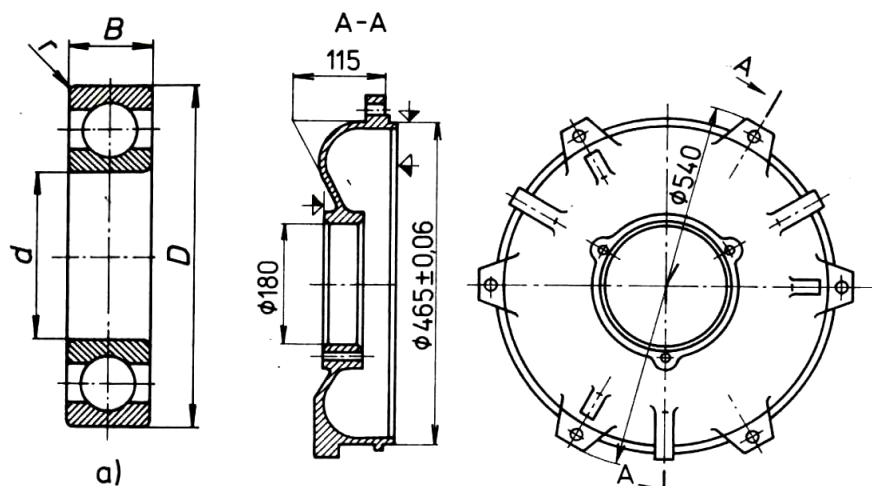
Kostra elektromotoru, ložisková čela, patky a různé krytky se dodávají v provedení z hliníku nebo z šedé litiny. Volba materiálu závisí převážně na vnějším prostředí, do kterého je motor určen. Pro vnější prostředí s agresivními vlivy bude vhodnější a odolnější provedení z šedé litiny a naopak do prostředí normálního provedení hliníkové. V odlévání koster převažuje hliník. Je to převážně díky jeho hmotnosti, což se pozitivně projeví na celkové hmotnosti výsledného motoru.

1.4.1 Hřídele

Hřídele elektrických strojů pro všeobecné použití se konstruují převážně z uhlíkových konstrukčních ocelí třídy 11 podle ČSN. Hřídele velkých nebo náročně namáhaných strojů musí být provedeny z ušlechtilých ocelí uhlíkových třídy 12 nebo ocelí slitinových, u nichž jsou vysoké hodnoty mechanických vlastností dány výsledkem složitého tepelného zpracování. Průměr hřídele bývá obvykle odstupňován a je potřeba určit počet osazení, jejich průměr a délku. Na největším průměru je uložen rotorový svazek. Počet a rozměry zbývajících osazení jsou dány dalšími konstrukčními částmi uloženými na hřídeli. Jako např. komutátor, ventilátor, sběrací kroužky, ložiska atd. [3, s. 536]

1.4.2 Ložiska a ložiskové štíty

U elektrických strojů s vodorovným hřídelem tvoří ložiska podpěry rotoru, která jsou radiálně zatížená tíhou součástí umístěných na hřídeli, nevyvážeností, magnetickým tahem, silami magnetického převodu a složkou tíhy i nevyvážeností připojeného hnacího nebo hnaného stroje. V axiálním směru ložiska zachycují složky sil šikmého ozubení pastorku, složky hydraulických tahů a další axiální síly podle druhu hnacího nebo hnaného zařízení, přenášené na hřídel elektrického stroje spojkou. Stroje malých a středních výkonů mají ložiska uložena v ložiskových štítech, které jsou rozebíratelně připevněny ke kostře. Ložiskové štíty zároveň plní funkci krytů čel statorového vinutí. U menších motorů se převážně užívá valivých ložisek válečkových nebo kuličkových. Výhodou kuličkových ložisek je schopnost přenášet síly radiálním i axiálním směrem. Válečková ložiska přenášejí sílu pouze radiálním směrem. Ložiska kluzná mají zastoupení převážně u strojů vyšších výkonů. [3, s. 548-554]



obr. 1.3 a) kuličkové ložisko normálního provedení, vpravo ložiskový štít
[3, s. 548]

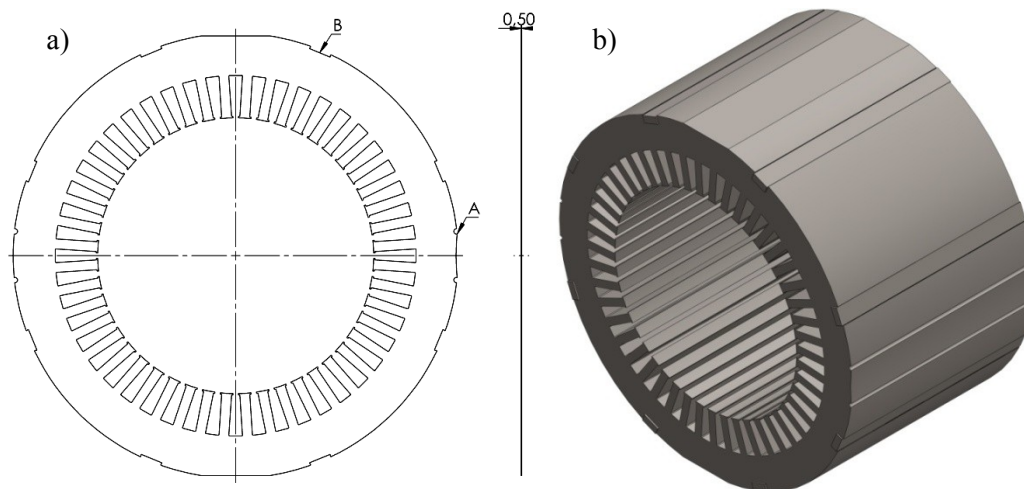
1.4.3 Magnetický obvod statoru

Magnetický obvod statoru se skládá z plechů pro elektrotechniku o tloušťce 0,5 mm jak je vidět na obr. 1.4 a. Tyto plechy jsou z oceli s vyšším obsahem křemíku a jsou válcovány za tepla. Do průměru 990 mm jsou lisovány vcelku. Pro průměry nad 990 mm je magnetický obvod skládán ze segmentů.

Na vnitřním obvodu plechů jsou vylisovány drážky požadovaného tvaru pro uložení statorového vinutí. Rozteče a rozměry jednotlivých zubů se mohou lišit o odchylky, které jsou dány tolerancemi pro výrobu lisovacích nástrojů. Z toho důvodu se při skládání z kruhových řezů ukládají jednotlivé výlisky do jedné vzájemné polohy, která je definována vylisováním zářezu A na vnějším obvodu.

Když jsou plechy vylisovány, tak se zbaví otřepů a ve většině případů opatří izolačním lakem. V případě velké axiální délky svazku se svazek rozdělí na jednotlivé pakety o tloušťce 40 až 60 mm. Rozdělení se provádí z důvodu lepšího chlazení stroje. Ventilačními výztuhami jsou mezi pakety vytvořeny radiální kanály o šířce deseti milimetrů. Ke krajním plechům paketu jsou ventilační výztuhy bodově přivařeny.

Skládání statorového svazku je dáno technologickými možnostmi každého závodu. Pro průměry svazku do 500 mm, může být použit následující postup. Na válcový přípravek o průměru stejném jako vnitřní průměr statoru se skládají kruhové výlisky, aby se při stlačení pod lisem zabránilo poklesu tlaku na obou koncích svazku. Zajištění se provede tak, že krajní části svazku se složí z ocelových plechů tloušťky větší než 0,5 mm. Ty se na několika vrstvách bodově svaří. Pod lisem se zajistí přehnutím konců ocelových pravítek, která jsou vložena do drážek předlisovaných na vnějším okraji svazku. Přehnuté konce pravítek se přivaří k lici posledního plechu. [3, s. 525-527]



obr. 1.4 a) příklad statorového plechu b) statorový svazek stažený pásy plechu

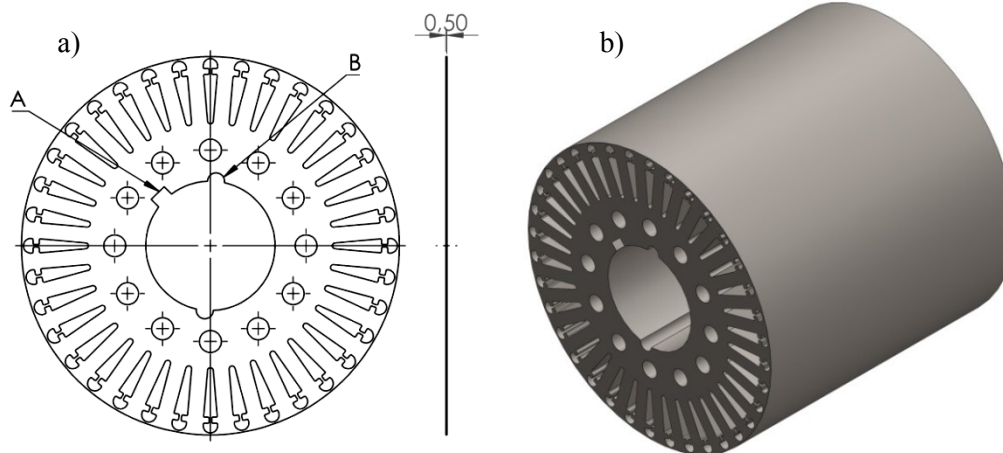
U sériové výroby se používá obdobný postup, ale místo pravítka se použije předběžně tvarovaný pásek plechu, který se vsune do rybinové drážky. Jeho konce se při lisování zahnou a tím zajistí celý svazek jako na obr. 1.4 b. Takto stažený statorový svazek se po navinutí, zaklínování a impregnaci upevní v kostře. [3, s. 525-526]

1.4.4 Magnetický obvod rotoru

Magnetický obvod rotoru je taktéž složen z ocelových plechů pro elektrotechniku válcovaných za tepla. U rotorů pro stroje s vnějším průměrem do 990 mm se používají jednotlivé mezidruhové plechy tloušťky 0,5 mm.

Na vnitřním obvodu jsou vylisovány drážky patřičných rozměrů pro vinutí. V rotorovém plechu mohou být vylisovány kruhové otvory o průměru 15 až 30 mm, sloužící jako axiální ventilační kanály. Při velkých radiálních výškách rotorového jha bývají otvory ve dvou i více řadách. Na vnitřním obvodu je vylisována drážka pro pero označena písmenem A na obr. 1.5 a, která zajišťuje přenos točivého momentu na hřídel. U menších motorů se vstřikově odlévanou klecí nakrátko je přenos točivého momentu zajištěn nalisováním s přesahem na vroubkovaný hřídel.

Aby se snížilo proložení drážek, jednotlivé mezidruhové plechy se skládají v rozsahu celého rotorového svazku stále do stejné vzájemné polohy. To je provedeno pomocí drážky pro pero nebo zářezem označeným písmenem B na obr. 1.5 a, který je vylisován na vnitřním průměru plechu. Po vylisování se plechy odhrotí a izolují lakováním. Po stlačení pod lisem se rotorový svazek stáhne stahovacími kruhy. Hotový rotorový svazek je nasazen na hřídel a musí být axiálně zajištěn z důvodu posunutí. Z jedné strany se opře o osazení hřídele většího průměru, na straně druhé je zajištěn přídržným kroužkem. Ten je zalícován do drážky hřídele. [3, s. 587-588]



obr. 1.5 a) příklad statorového plechu b) rotorový svazek

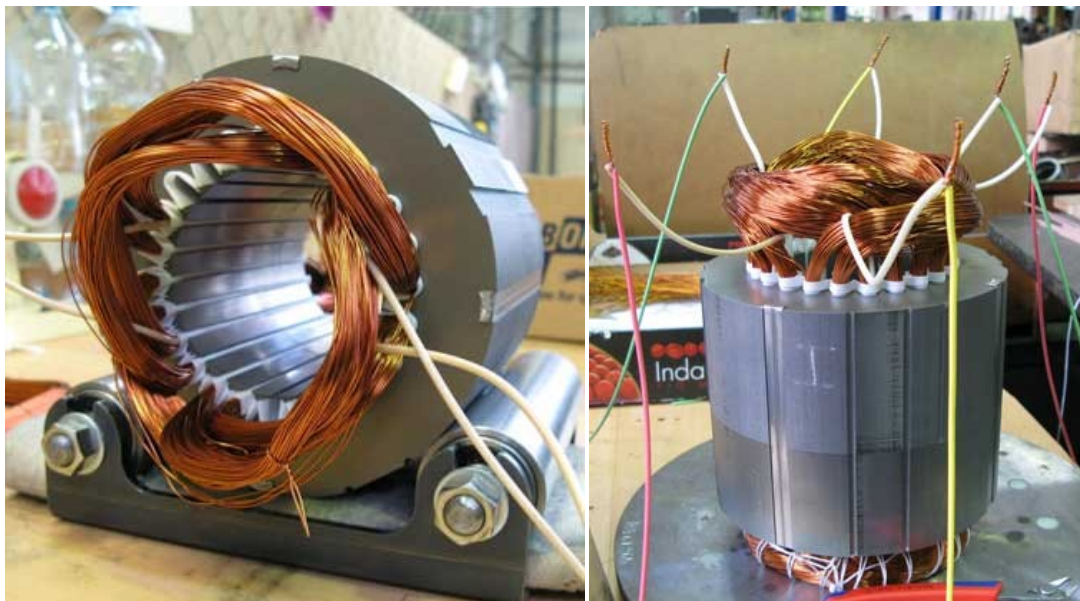
1.4.5 Statorové vinutí

Jak již bylo řečeno, statorové vinutí je uloženo v drážkách a připojeno ke zdroji střídavého proudu. Vinutí asynchronních strojů se dělí na vinutí vsypávaná s měkkými cívkami, vinutí s polotuhými cívkami, tuhými cívkami a tyčová vinutí.

Vinutí vsypávaná se ukládají do polozavřených drážek, které mají úzké otevření. Tímto otevřením se jednotlivé vodiče postupně vsypávají do drážky, z toho název vsypávaná vinutí. Při použití strojního navíjení se každý závit navine do drážky samostatně nebo se předem navinou skupiny cívek, které jsou celé vtáhnuty do určených drážek. Navíjení se provádí pomocí poloaautomatických nebo automatických navíjecích strojů.

Pro vsypávaná vinutí se používá největšího průměru drátu 1,8 mm, jelikož dráty větších průměru jsou příliš tuhé a špatně se upevňují v drážkách. Taktéž činitel plnění drážky by nebyl příliš velký. Potřebný průměr vodiče se vytvoří několika dílčími, paralelními vodiči. U návrhu stroje se pro snížení paralelních vodičů zvolí vinutí s několika paralelními větvemi.

Izolační provedení vsypávaného vinutí nezajistí dostatečnou elektrickou pevnost pro napětí nad 1000 V. Taktéž malá mechanická pevnost, čelních částí vsypávaného vinutí, jej nedovoluje použít pro stroje s výkonem nad 500 kW, jelikož proudové rázy v těchto strojích vyvolávají dynamické namáhání vinutí. Z těchto důvodů se vsypávaná vinutí používají u strojů do výkonu 100 kW při jmenovitých napětích do 660 V. [3, s. 53]



obr. 1.6 Příklad provedení vsypávaného vinutí

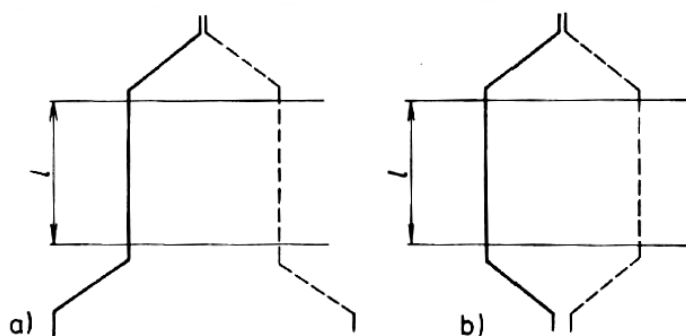
Vinutí z polotuhých a tuhých cívek se používá u strojů nad 100 kW. Vyrábějí se z vodičů s pravoúhlým průřezem z důvodu zvýšení mechanické pevnosti. Cívky jsou navíjeny na tvarovacích šablonách a před uložením do drážek jsou opatřeny izolací. Po uložení do drážek jsou jejich konce navzájem provázány a v případě velkých vyložení se čela opatří podpěrnými kruhy. Zajištění čel vinutí se provede různými bandážemi, proklady a zaklínováním. Je však nutné zajistit dostatečné chlazení sousedních čel cívek. Toto opatření razantně zlepšuje chlazení v porovnání se vsypávanými vinutími.

U strojů na vysoké napětí (3 kV) nebo u strojů zvláštního provedení mají cívky průběžnou nebo kombinovanou izolaci a jsou uloženy do otevřených drážek obdélníkového profilu. Takováto vinutí jsou provedena pomocí tuhých cívek. Cívky jsou navinuty z pásů s průřezem nepřevyšujícím $17 - 20 \text{ mm}^2$. Pro větší průřezy jsou vodiče rozděleny. [3, s. 53-54]



obr. 1.7 Vinutí z polotuhých cívek

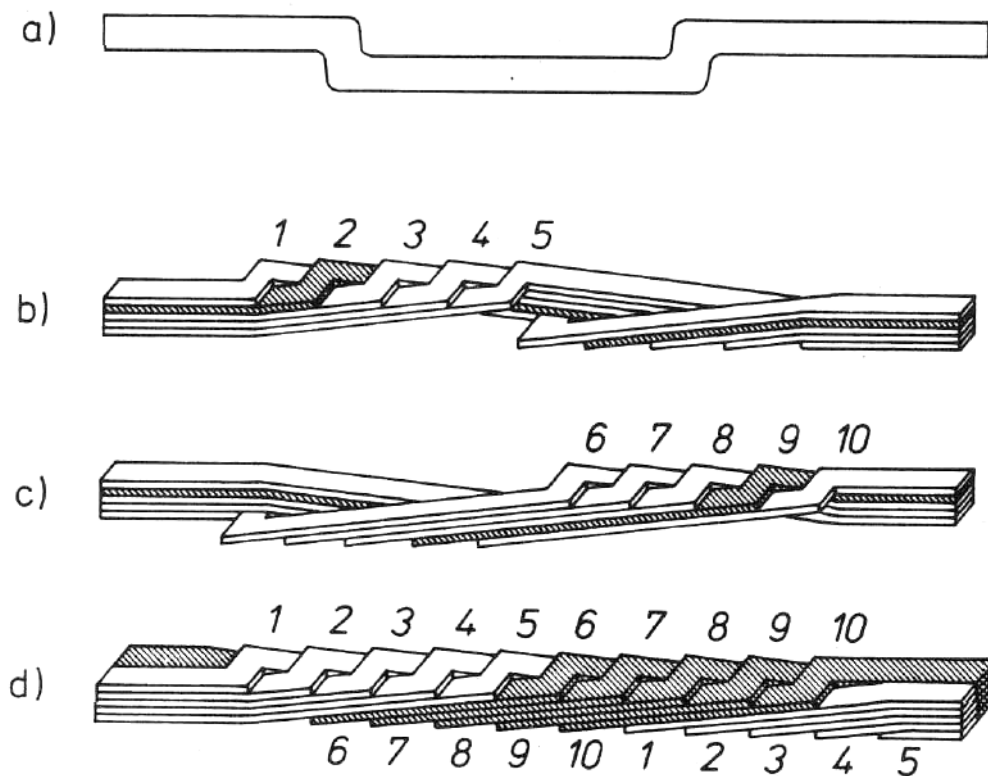
Tyčová vinutí jsou rozdílná od předchozích v tom, že se neuvažuje jako cívka, ale jako tyč, která představuje polovinu cívky. Tyče se do drážek vkládají postupně a až po vložení se vzájemně propojují. Čímž jsou vytvořeny závity vinutí. Směr ohýbání čel vinutí vzhledem k drážkové části určuje, zda vinutí bude smyčkové či vlnové. Provedení je vidět na obr. 1.8.



obr. 1.8 Schematické znázornění tyčového vinutí, a) vlnového, b) smyčkového [3, s. 55]

Tyčová vinutí mají zastoupení u velkých strojů jako statorová vinutí nebo jako rotorová pro střední a velké asynchronní stroje. Pro statorová vinutí se tyče nevyrábějí z jednoho masivu, ale jsou provedeny z velkého počtu dílčích paralelních vodičů. Je to z důvodu elektrického proudu o průmyslové frekvenci, který by zvyšoval ztráty vířivými proudy. Součet dílčích průřezů jednotlivých vodičů odpovídá průřezu tyče. Pro snížení povrchového jevu jsou vodiče skládány zvláštním způsobem, provádí se tzv. transpozice. Každý vodič zaujímá všechny

polohy v drážce v rozmezí délky stroje. Jako příklad je uvedena Roebelova tyč na obr. 1.9. [3, s. 55 - 56]



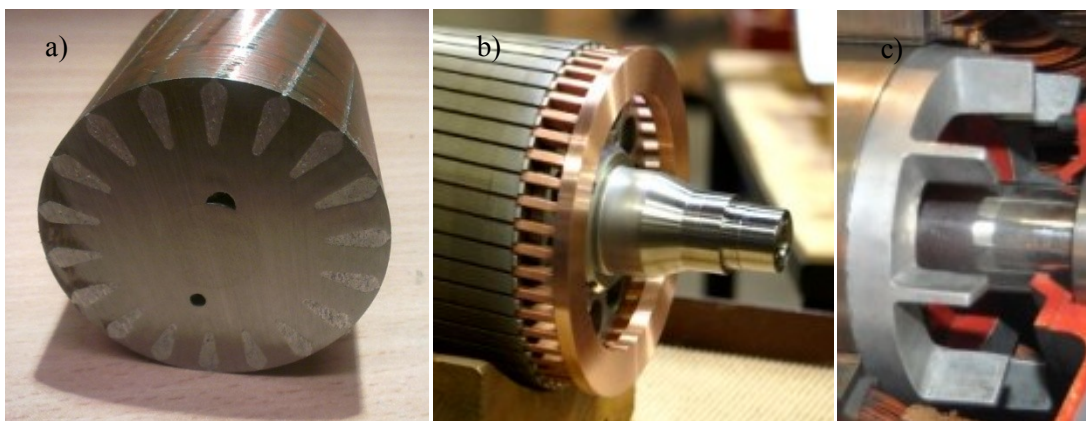
obr. 1.9 Schematické uspořádání Roebelovy tyče a) ohnutí jednoho pásu, b), c) složené poloviny tyče, d) složená Roebelova tyč. [3, s. 57]

Frekvence proudu v rotorech asynchronních strojů nepřesahuje 1 – 2 Hz, z toho důvodu se tyče rotorového vinutí nedělí na dílčí vodiče, ale jsou tvořeny z plných profilů. Drážky rotorového vinutí mohou být navrženy jako uzavřené nebo polouzavřené díky mechanické pevnosti jednotlivých tyčí. Tyče se mohou před vložením ohnout na jedné straně a druhý ohyb, který je nutný pro dotvarování symetrické cívky, je proveden až po zasunutí celé tyče do drážky.

Při návrhu vinutí elektrického stroje musíme dbát na vzdálenosti mezi čely vinutí, z důvodu dobrého průchodu chladícího vzduchu a zajištění izolačních vlastností. Nesmí se opomenout minimální izolační vzdálenosti mezi čely vinutí a okolními částmi stroje jako kostra, ložiskové štíty atd. Nejzranitelnějším místem izolace vinutí jsou části při výstupu cívky z drážky, kde se intenzita elektrického pole zvětšuje a zároveň izolace cívek je oslabena v důsledku ohybu čel. Aby se toto riziko snížilo, není ohyb přímo u výstupu z drážky, ale přímá část cívky je poněkud delší, čímž se ohyb posune od výstupu. U vsypávaných a polotuhých vinutí se pro zvýšení elektrické pevnosti v tomto místě zesiluje izolace. [3, s. 56-57]

1.4.6 Rotorové vinutí

Vinutí nakrátko se používá jako rotorové vinutí u asynchronních strojů (asynchronní motor s kotvou nakrátko), mimo jiné také jako tlumící či rozběhové vinutí u strojů synchronních. Odlišnost tohoto vinutí od jiných je v tom, že postrádá izolaci mezi drážkovou částí vinutí a stěnami drážky. U některých zvláštních provedení *m*fázového vinutí nakrátko se s izolací můžeme setkat, ale je to velice ojedinělý jev. Vinutí nakrátko u asynchronních motorů bývá označováno jako klec nakrátko. Dle konstrukce a technologie výroby se tyto rotory rozdělují na dva základní typy: natvrdo pájené nebo odlévané. Jednotlivé příklady jsou uvedeny na obr. 1.10 a, b.



obr. 1.10 Kotva nakrátko s a) odlévaným vinutím, b) s natvrdo pájeným vinutím, c) kruh nakrátko s lopatkami

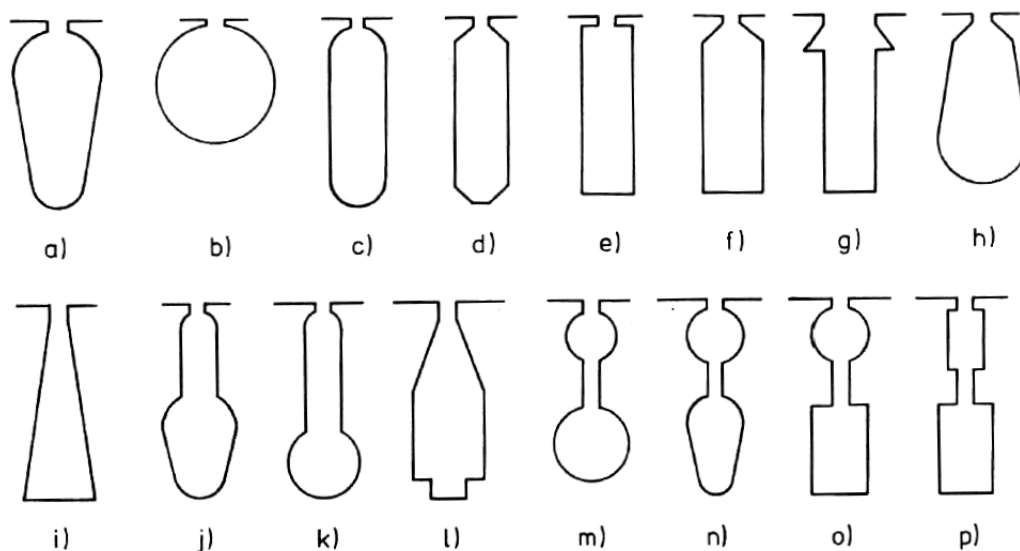
Vinutí pájená natvrdo se provedou nasunutím tyčí do drážek a v čelech se spojí kruhy nakrátko, které se přivaří nebo připájí natvrdo. Při odlévání vinutí jsou tyče i kruhy vytvořeny současně při tlakovém lití ve speciální formě. Na kruzích krátka jsou nejčastěji zhotoveny i ventilační lopatky, které slouží k lepšímu odvodu tepla a zároveň slouží jako ventilátor. Tato úprava je patrná z obr. 1.10 c.

Kruhy nakrátko mohou přiléhat těsně na rotor, nebo mohou být umístěny v určité vzdálenosti. Kruhy u strojů s odlévanou kotvou nakrátko vždy přiléhají k rotoru. Mimo svou hlavní funkci, spojení tyčí nakrátko, plní také druhou funkci, držení svazku ve slisovaném svazku. Nahrazují konstrukci pro stahování rotoru. Kruhy nakrátko u rotorů s natvrdo pájeným vinutím bývají navrženy tak, aby k rotoru nepřiléhaly.

Tvar rotorových drážek a konstrukce vinutí rotorů nakrátko jsou ovlivněny výkonem motoru a požadavky na jejich rozběhové charakteristiky. Stroje s výkony do 50 – 60 kW mají obvykle drážku typu V a odlévané vinutí (obr. 1.11 a). Rozměry drážky se volí tak, aby zuby měly rovnoběžné stěny. Drážky kruhového typu K (obr. 1.11b) se používaly u malých strojů, ale již se téměř nepoužívají kvůli nerovnoměrnosti průřezu zubu. Drážky se stěnami rovnoběžnými mají uplatnění u strojů s odlévaným (obr. 1.11 c, d) i pájeným vinutím (obr. 1.11 c, e, f). Pro pájená vinutí je nutností vyrobít tyče z pásů zvláštního tvaru. U vícepólových asynchronních motorů nakrátko se někdy používají rovnoběžné drážky

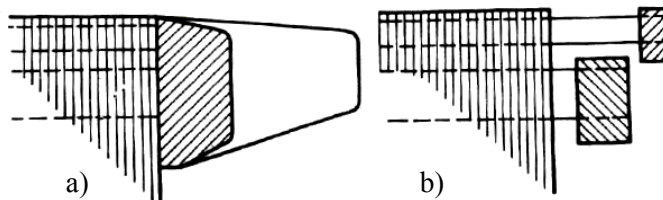
(obr. 1.11 g), kde jsou tyče vyrobeny z pásů obdélníkového průřezu. Pro zvýšení záběrného momentu motoru se drážky s rovnoběžnými stěnami navrhují úzké a hluboké., jelikož povrchový jev vzrůstá s výškou tyče. Rotory s těmito drážkami se nazývají vírové a k nim se musí přiřadit drážky podle obr. 1.11 h, i, j, k.

U asynchronních motorů, které mají výkony nad 100 – 120 kW, nebo rychloběžných, se většinou nepodaří žádaný záběrný moment získat za použití rovnoběžných hlubokých drážek a tak se přechází ke tvarům zvláštním. Používají se složitější tvary jako (obr. 1.11 j, k). Všechny tyto drážky jsou si podobné, jsou v blízkosti vzduchové mezery užší než v dolní části. To umožní lepší využití vytlačovaného proudu při záběru, skluz blížící se 1. Drážky dle (obr. 1.11 h, j, k). Jsou používány pro odlévané vinutí, drážka (obr. 1.11 i) se používá pro vinutí pájená natvrdo.



obr. 1.11 Tvary rotorových drážek asynchronních motorů [3, s. 59]

Rotory asynchronních motorů, které jsou určeny k těžkým rozběhům, se vyrábějí v dvouklecovém provedení typu Boucherot (obr. 1.11 m, n, o, p). Mají v každé drážkové rozteči uloženy dvě tyče nad sebou. Každá soustava tyčí vytváří vlastní vinutí. Tyče ležící blíže ke vzduchové mezeře tvoří rozběhové vinutí a druhá soustava tvoří tzv. pracovní vinutí.



**obr. 1.12 Provedení kruhů nakrátko rotorových vinutí asynchronních motorů,
a) odlévané vinutí dvouklecové, b) pájené vinutí dvouklecové [3, s. 58]**

Dvojitá klec se provádí ve dvou variantách, se společnými kruhy nakrátko (obr. 1.12 a), nebo s oddělenými kruhy nakrátko (obr. 1.12 b). V prvním provedení kruh spojuje nakrátko tyče rozběhového i pracovního vinutí. U druhého typu jsou použity kruhy dva. Jeden spojuje pracovní vinutí a druhý rozběhové vinutí.

Vinutí dvojitě klece je nejčastěji pájené s oddělenými kruhy nakrátko (obr. 1.12 b, a obr. 1.11 m, o, p). Pracovní vinutí se nejčastěji zhotovuje z mědi a rozběhové vinutí z materiálu s větší rezistivitou jako je mosaz. Ta má i mimo jiné větší tepelnou kapacitu. Této vlastnosti bude využíváno převážně u motorů s dlouhotrvajícím těžkým rozběhem, kde mohou ztráty ve vinutí vznikající při rozběhu, zahřát vinutí na nepřijatelnou teplotu.

Nejrozšířenější provedení dvouklecového rotoru je za pomoci tlakového lití, kdy je celá klec odlita z jednoho materiálu, převážně hliníku nebo jeho slitin (obr. 1.11 n). Kruhy nakrátko těsně přiléhají k plechům, jako je na obr. 1.12 a. [3, s. 57-60]

Rotorová vinutí kroužkových asynchronních motorů se svojí konstrukcí a způsobem zapojení liší od statorových vinutí. U strojů do 80 – 100 kW se pro rotory obvykle používají dvouvrstvá cívková vinutí. Konstrukčně se od statorových vinutí téměř neliší, pouze v čelech, která jsou opatřena bandážemi, které zachycují odstředivé síly. Rozdíl v zapojení je ve volbě začátků fází vinutí. U statorových vinutí se začátky fází volí tak, aby byla zajištěna kompaktnost vývodů (nejmenší délka). U rotorových je naopak snaha rozložit vývody rovnoměrně po obvodu rotoru, aby bylo docíleno rovnoměrného rozložení váhy v ose hřídele.



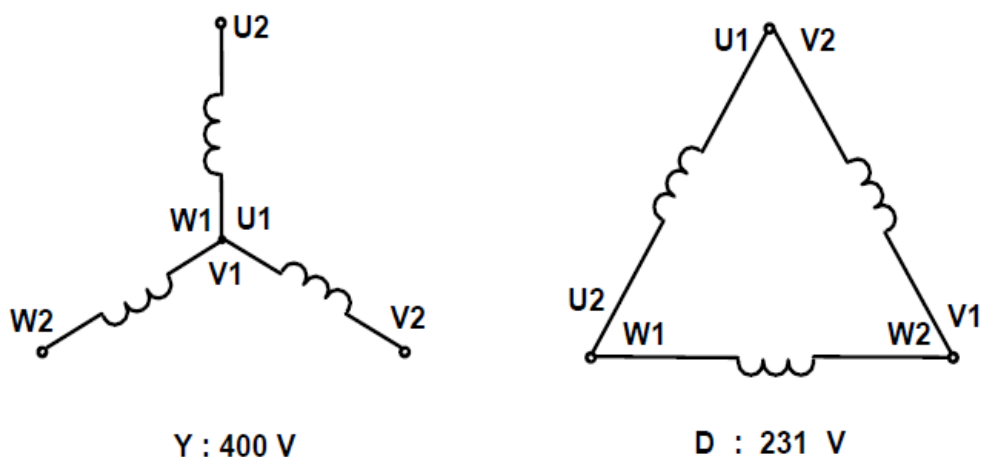
obr. 1.13 Rotorové vinutí s asynchronního motoru s kroužky[1, s. 57]

Se zvětšujícími rozměry stroje se snižuje počet závitů statorového vinutí a tím pádem se musí snižovat i počet závitů rotorového vinutí. Jinak by docházelo k nárůstu napětí na kroužcích. To by mohlo vést k potížím se zaručením izolačních vlastností při spouštění stroje. Z toho důvodu se u strojů středních a velkých výkonů nahrazuje cívkové vinutí za vinutí tyčové, které má v drážce vždy dva vodiče. Počet závitů se tím snižuje a fázový proud narůstá. Průřez tyče je proto mnohem větší než průřez vodiče statorového vinutí. Vinutí takovýchto rotorů se

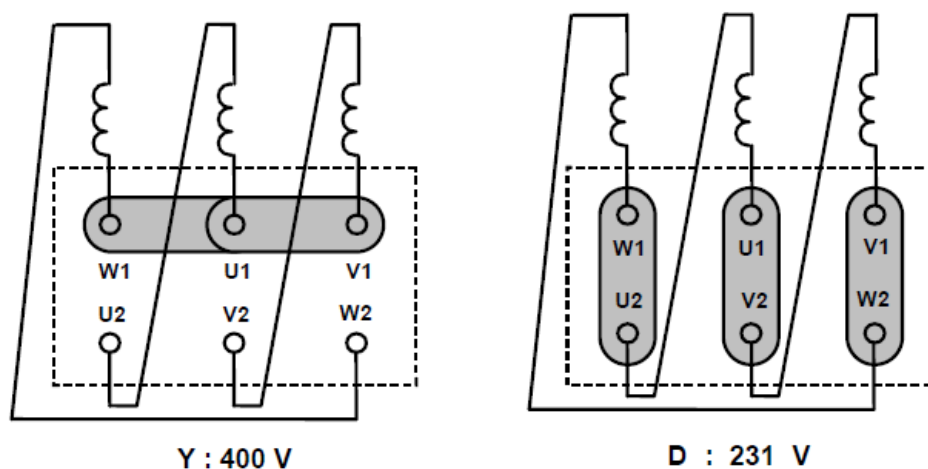
převážně konstruuji jako vlnová, jelikož mají menší počet skupinových spojek. Technologie výroby spojek je obtížná kvůli velkým průřezům tyčí. [3, s. 105-106]

Dle výše zmíněného konstrukčního uspořádání rozeznáváme dva typy asynchronních motorů. Jsou to motory s kotvou nakrátko a kotvou kroužkovou. Na kroužky dosedají kartáče, které slouží jako kluzné kontakty. Ty dosedají na kroužky trvale nebo po dobu rozběhu motoru a poté se vinutí spojí nakrátko (zkratovačem) a kartáče se zvednou nad kroužky. Ke kartáčům se připojuje zařízení k úpravě vlastností stroje (velikost rozběhového proudu, momentu, otáček). [2, s. 10]

Jakmile jsou zapojeny jednotlivé cívky, získáme 6 vývodů jak je vidět na obr. 1.6, které jsou zapojeny na svorkovnici motoru. Svorkovnice obsahuje 6 svorek pro připojení jednotlivých vývodů. Pomocí spojek (plíšků) zajistíme zapojení motoru do hvězdy – Y nebo do trojúhelníku – D. Základní zapojení vinutí a svorkovnice je provedeno dle obr. 1.14, obr. 1.15. [1, s. 55-56]



obr. 1.14 Elektrické zapojení vinutí asynchronního motoru [1, s. 55]



obr. 1.15 Zapojení svorkovnice asynchronního motoru [1, s. 56]

1.4.7 Štítek asynchronního stroje

Základní údaje, které jsou důležité nejen pro výrobce, ale i pro uživatele jsou umístěny na výkonostním štítku stroje. Štítek musí být proveden, tak aby informace na něm napsané byly čitelné po celou dobu životnosti stroje. Informace na štítku asynchronního stroje jsou tyto:

- Druh stroje – asynchronní motor / generátor
- Druh proudu – třífázový / jednofázový
- Jmenovitý výkon v kW
- Jmenovité statorové napětí ve V¹
- Jmenovitý statorový proud v A
- Jmenovitý kmitočet v Hz
- Jmenovité otáčky v ot·min⁻¹
- Jmenovitý účinník
- Spojení statorového vinutí – Y / D
- Provedení rotorového vinutí – Y / D
- Rotorové napětí ve V – napětí naprázdno na rozpojeném rotoru
- Rotorový proud v A
- Spojení rotorového vinutí
- Druh zatížení – trvalé / přerušované / přerušovaný chod – uvádí se značkou *IM*
- Stupeň krytí stroje před nebezpečným dotykem a před vniknutím cizích těles a vody *IP*
- Druh chlazení – udává se značkou, která vyjadřuje druh chladiva a způsob chlazení *IC*

¹ Na štítku se mohou označit jmenovitým napětím (sdruženým) např. 400/230 V pouze tehdy,

- Druh pracovního prostředí pokud je jiné než normální
- Třída izolace vinutí

Na výkonostním štítku je také uveden název výrobce, jeho sídlo, rok výroby, typ (obvykle uveden i počet pólů), výrobní číslo, hmotnost stroje a některé další údaje. Pokud je stroj určen pouze pro jeden směr otáčení, musí být na stroji uveden smysl otáčení rotoru. Smysl otáčení rotoru je směr, když pozorovatel vidí otáčet se hřídel při pohledu na stranu pohonu stroje. Stroj je pravotočivý, když se hřídel otáčí při pohledu na stranu pohonu ve smyslu hodinových ručiček. [2, s. 10-11]

1.5 Princip činnosti asynchronního motoru

Stator s rotorem asynchronního stroje nejsou nijak elektricky navzájem spojeny. Název indukční stroj pochází z vlastního principu činnosti stroje. Jelikož přenos výkonu na rotor je způsoben elektromagnetickou indukcí. Princip činnosti asynchronního stroje je vlastně založen na vzájemném elektromagnetickém působení točivého magnetického pole statoru a proudů, které jsou vyvolány ve vinutí rotoru tímto polem. Vzduchová mezera mezi statorem a rotorem má být co nejmenší, aby magnetická vazba byla co nejlepší. [2, s. 11]

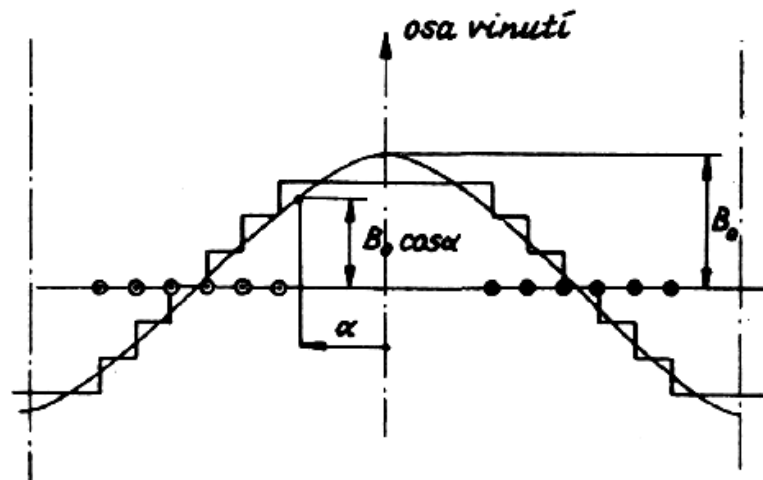
Vinutí je provedeno z izolovaných drátů, které jsou určitým způsobem propojeny a vsazeny do magnetického obvodu stroje. Prochází-li takovýmto vinutím elektrický proud, vznikne v jeho okolí magnetické pole. Indukční čáry tohoto pole se uzavírají přes stator, vzduchovou mezeru a rotor. Za severní pól se může považovat místo, kde indukční čáry vystupují z magnetického obvodu statoru a naopak místo kde vstupují za pól jižní. Stator s jedním vinutím vytvoří jednu dvojici pólů.

Magnetické pole (magnetický tok) závisí na tzv. magnetomotorickém napětí (mmn) podle Hopkinsova zákona.

$$\Phi = U_m \cdot G_m \quad (Wb) \quad (1.1.)$$

Kde $U_m = NI = \int H dl$ je magnetomotorickém napětí v A
 G_m magnetická vodivost v H

Mmn, které je závislé na magnetizačním proudu a počtu závitů, rozhoduje o velikosti magnetického toku.



obr. 1.16 Rozložení mmn po obvodu statoru při jedné dvojici pólů. Obvod vyjádřen v rozvinutém tvaru [4, s. 8]

Bude-li hodnota magnetické indukce v železe statoru a rotoru daleko od stavu nasycení, poté rozložení indukce ve vzduchové mezeře bude obdobné jako mmn po obvodě statoru. Jelikož magnetický odpor drah, po kterých se uzavírají indukční čáry, je dán převážně odporem vzduchové mezery. Budeme uvažovat, že příslušná funkce (mmn, magnetická indukce) je rozložena po obvodu statoru sinusově. Poté podle obr. 1.16 platí pro hodnotu indukce ve vzdálenosti α od osy vinutí rovnice:

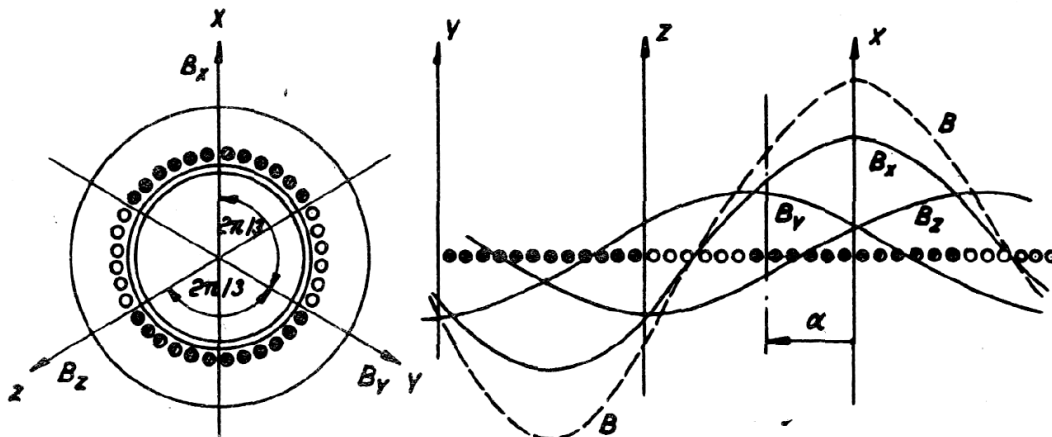
$$B = B_0 \cos \alpha \quad (1.1.)$$

Když přivedeme na vinutí statoru sinusové napětí, tak tok procházející vinutím a magnetická indukce se bude v libovolném bodě obvodu statoru s časem měnit podle sinusového zákona. Jestliže označíme maximální hodnotu indukce na ose vinutí B_m , tak platí:

$$B_0 = B_m \cos \omega t \quad (1.2.)$$

a
$$B = B_0 \cos \alpha = B_m \cos \omega t \cdot \cos \alpha \quad (1.3.)$$

Podstatou trojfázového asynchronního motoru je vznik točivého magnetického pole ve vinutí. Za předpokladu že ve statoru jsou uložena tři vinutí, jejichž osy jsou pootočený o úhel 120° a zároveň na ně přivedeme sinusově proměnné napětí, tak vytvoří symetrický třífázový systém dle obr. 1.17.



obr. 1.17 Symetrický třífázový systém [4, s. 9]

Z obr. 1.17 vyplývá, v bodě posunutém o úhel α od osy vinutí x v kladném směru platí pro magnetickou indukci B :

$$B = B_x + B_y + B_z \quad (1.4.)$$

Kde B_x , B_y , B_z jsou indukce od pulsujících polí vytvořených třemi vinutími. Přitom platí:

$$B_x = B_{x0} \cos \alpha = B_m \cos \omega t \cdot \cos \alpha \quad (1.5.)$$

$$B_y = B_{y0} \cos \left(\alpha + \frac{2\pi}{3} \right) = B_m \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(\alpha + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (1.6.)$$

$$B_z = B_{z0} \cos \left(\alpha + \frac{4\pi}{3} \right) = B_m \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \cos \left(\alpha + \frac{4\pi}{3} \right) \quad (1.7.)$$

Kde B_{x0} , B_{y0} , B_{z0} jsou magnetické indukce v příslušných osách vinutí a B_m je maximální hodnota indukce v ose těchto vinutí. Výsledné trojfázové symetrické vinutí dostaneme sečtením předchozích tří výrazů.

$$B = \frac{3}{2} B_m \cos(\omega t + \alpha) = B_\infty \cos(\omega t + \alpha) \quad (1.8.)$$

Předpokládejme, že $\alpha = -\omega t$, tj. bod kde vyšetřujeme výslednou indukci, se pohybuje rychlostí ω v záporném smyslu od osy vinutí x . V tom případě

$$B = \frac{3}{2} B_m = B_\infty \quad (1.9.)$$

Z toho plyne, že osa výsledného magnetického pole se otáčí ve směru hodinových ručiček s úhlovou rychlostí ω a otočí se o plný úhel $\alpha = 2\pi = 360^\circ$. To odpovídá rozteči dvou pólových dvojic $2\tau_p$. Doba otočení odpovídá jedné periodě střídavého proudu, kterým jsou

vinutí napájena. Vektor výsledné indukce zůstává konstantní. Rozložení magnetické indukce po obvodu statoru je dáno sinusovým zákonem. [4, s. 8-9]

Magnetická vazba mezi vinutím vstupním a výstupním je u asynchronního stroje stejná jako u transformátorů. Rozdíl je ovšem v tom že výstupní vinutí asynchronního stroje se otáčí. Musí ale existovat relativní pohyb rotoru vzhledem k točivému poli statoru. [2, s. 11]

Rotor se vlastně zpožďuje za točivým magnetickým polem statoru. Bez tohoto zpoždění by se v rotorovém vinutí neindukovalo napětí a nemohl by jím procházet proud. Jelikož jsou rotorové tyče na koncích spojeny, tak v nich točivé magnetické pole indukuje napětí, které následně vybudí proud. Ten je zdrojem magnetického pole. Toto pole začne zabírat s točivým magnetickým polem statoru a rotor se začne otáčet.

Rotor nemůže nikdy dosáhnout synchronních otáček, ani v případě stavu naprázdno, když je hřídel nezatížená. Z toho název asynchronní stroj. Je to dáno existencí tření v ložiskách, popřípadě odporem ventilátoru, který rotor brzdí. Otáčky rotoru tedy budou vždy o něco nižší než otáčky magnetického pole statoru. Tento rozdíl je definován tzv. skluzem s . [1, s. 58]

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\frac{\omega_1}{p} - \Omega}{\frac{\omega_1}{p}} \quad (1.10.)$$

Kde

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1.11.)$$

n, Ω jsou otáčky a mechanická úhlová rychlost rotoru²

p počet pólů stroje

f statorová frekvence

ω_1 úhlová rychlost magnetického pole statoru

Při zatížení je pokles otáček malý a je závislý na zatížení. Nejvyšší možné otáčky dvoupólového motoru při frekvenci sítě 50 Hz jsou $n_s = 3000 \text{ min}^{-1}$. Skluz je nejčastěji uváděn v procentech a u malých motorů dosahuje až 10%, naopak u velkých motorů až pod 1%. Zpravidla je udáván při jmenovitém zatížení asynchronního stroje a je definován jako rozdíl otáček k otáčkám synchronním. Výsledný vztah pro skluz je dán: [1, s. 58-59], [2, s. 11-12]

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad (1.12.)$$

Dvoupólový asynchronní motor, který má trojfázové statorové vinutí a na rotoru je umístěno mnohofázové klecové vinutí viz obr. 1.18. Tímto statorovým vinutím protéká proud I_1 , ten vytvoří magnetomotorické napětí (F_{m1}), které se otáčí úhlovou rychlostí

² V případě obecného dvoupólového stroje, je možné zaměnit mechanickou úhlovou rychlost Ω za elektrickou úhlovou rychlost ω

$$\omega_1 = 2\pi f_1 \frac{1}{p} \quad (1.13.)$$

Ve stejném smyslu se otáčí i rotor, úhlovou rychlostí

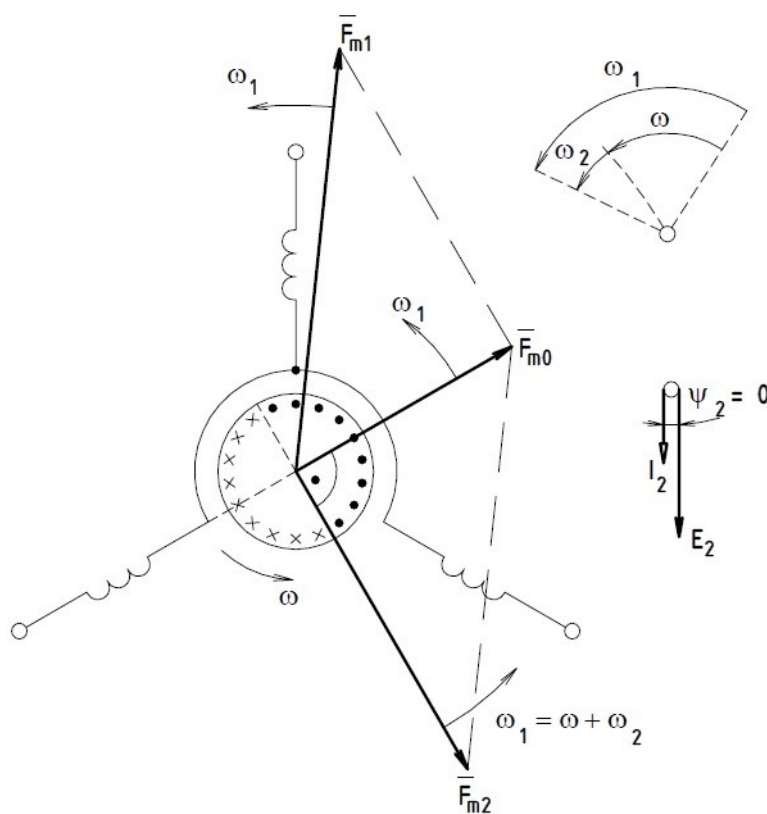
$$\omega = \omega_1 \cdot (1 - s) \quad (1.14.)$$

Napětí, které se indukuje v tyčích rotoru, bude mít frekvenci

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (1.15.)$$

Tyčemi rotoru protékají proudy, ty vytvoří mmn rotoru. Toto mmn (F_{m2}) se vůči rotoru otáčí úhlovou rychlostí

$$\omega_2 = s \cdot \omega_1 \quad (1.16.)$$



obr. 1.18 Smysl otáčení vektorů magnetomotorického napětí statoru a rotoru
[2, s. 12]

Jelikož se rotor otáčí úhlovou rychlostí ω ve stejném smyslu jako stator, bude výsledná rychlost F_{m2} :

$$\omega_2 + \omega = \omega_1 \cdot (1 - s) + s \cdot \omega_1 = \omega_1 \quad (1.17.)$$

Při libovolném skluzu se vektory magnetomotorického napětí statoru F_{m1} a rotoru F_{m2} otáčejí ve stejném smyslu konstantní úhlovou rychlostí ω_1 . To znamená, že pole statoru a rotoru se vůči sobě nepohybují. Což je fiktivní představa. Ve stroji totiž existuje pouze jedno výsledné pole dané magnetickým tokem Φ , které je složeno z pole statoru a rotoru. Tento tok se v rozsahu zatížení příliš nemění. To znamená od stavu naprázdno do jmenovitého zatížení stroje. Mimo hlavní magnetický tok Φ jsou ve stroji i rozptylové toky, které jsou spřaženy buď s vinutím statoru, nebo rotoru.

Asynchronní stroj tedy může pracovat pouze při rovnosti úhlových rychlostí magnetomotorických napětí F_{m1} a F_{m2} . Což znamená, že stator a rotor musí mít stejný počet pólů.

$$p_1 = p_2 = p \quad (1.18.)$$

Počet fází vinutí statoru a rotoru může být v principu různý. Výsledné magnetomotorické napětí vytvoří součet obou mmn.

$$F_{m0} = F_{m1} + F_{m2} \quad (1.19.)$$

Výsledné mmn F_{m0} budí točivé magnetické pole stroje.

Mmn byla uvažována jako prostorové vektory. Můžeme je však vyjádřit i jako časové vektory neboli fázory. Fázor mmn F_{m1} a fázor proudu I_1 leží vždy ve stejném směru. To znamená, že úhel, který svírají je roven nule.

Velikost rotorového napětí a proudu, jak vyplývá z fyzikálního principu indukčního stroje, bude závislá na velikosti skluzu. Dle základní rovnice pro střídavé stroje

$$U = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \phi \cdot k_v \quad (1.20.)$$

bude ve statorovém vinutí indukované ideální napětí

$$U_{i1} = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1} \cdot \phi \quad (1.21.)$$

Ideální rotorové napětí, motoru s vinutým rotorem, který stojí a rotorové vinutí má rozpojeno

$$U_{i2} = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot k_{v2} \cdot \phi \quad (1.22.)$$

Protože rotor stojí, tak $f_1 = f_2$. Rotorové napětí je maximální.

Druhý případ je ideální chod motoru naprázdno, rotor se otáčí synchronními otáčkami ($n = n_1$, $s = 0$ a $f_2 = 0$). V takovémto případě je rotorové napětí nulové. Napětí, které se indukuje v rotoru, v případě libovolných otáček je

$$U_2 = 4,44 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot k_{v2} \cdot \phi = 4,44 \cdot s \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot k_{v2} \cdot \phi \quad (1.23.)$$

$$U_2 = s \cdot U_{i2} \quad (1.24.)$$

nebo

$$U_2 = s \cdot U_{20} \quad (1.25.)$$

kde U_{20} je napětí naprázdno

Převod asynchronního stroje

$$p_u = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{N_1 \cdot k_{v1}}{N_2 \cdot k_{v2}} \quad (1.26.)$$

$$\begin{aligned} U'_{i2} = p \cdot U_{i2} &= \frac{N_1 \cdot k_{v1}}{N_2 \cdot k_{v2}} \cdot 4,44 \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot k_{v2} \cdot \phi = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1} \cdot \phi \\ &= U_{i1} \end{aligned} \quad (1.27.)$$

Indukovaným napětími v rotoru vytvoří proud

$$I_2 = \frac{U_2}{\sqrt{R_2^2 + (2\pi \cdot f_2 \cdot L_2)^2}} = \frac{s \cdot U_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (s \cdot X_2)^2}} \quad (1.28.)$$

po úpravě dostaneme

$$I_2 = \frac{U_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}} \quad (1.29.)$$

Z této rovnice je patrné, že asynchronní stroj pracuje při všech otáčkách jako transformátor, který by byl na sekundární straně zatížen ohmickým odporem $\frac{R_2}{s}$. [2, s. 12-14]

1.5.1 Funkce a pracovní stavy

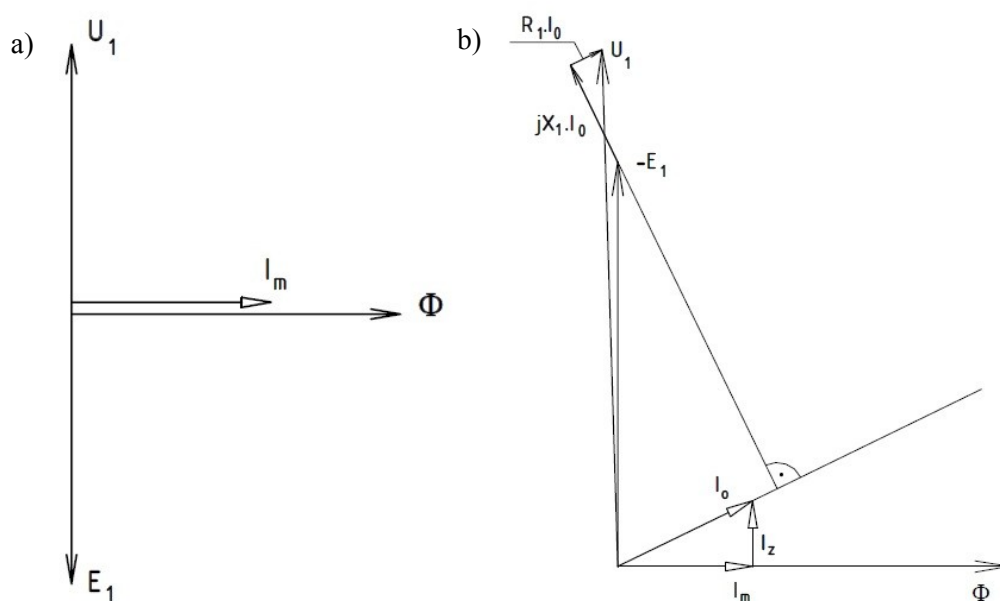
Asynchronní stroj může pracovat jako motor, generátor nebo jako brzda. Přechod mezi jednotlivými stavy je zcela plynulý. Pracovní stav asynchronního stroje je nejlépe vyjádřen skluzem. A to jak jeho velikostí, tak znaménkem.

Pracovní stavy, jako je stav naprázdno a nakrátko, budou popsány v následujících odstavcích.

Když bude stroj pracovat jako motor: Pokud by se rotor otáčel stejnou rychlostí jako magnetické pole ve vzduchové mezeře, tj. synchronními otáčkami, nevzniknul by mezi rotorem a točivým magnetickým polem relativní pohyb. Skluz a frekvence by byli nulové. Čímž by se ve vodičích rotoru neindukovalo žádné napětí a neprocházel by jimi proud. Vinutí statoru by ze sítě odebíralo pouze magnetizační proud I_m , který je potřeba k vytvoření magnetického toku ϕ . Tento tok je ve statorovém vinutí indukován elektromotorickou silou E_1 , která je o $\frac{\pi}{2}$ fázově posunuta za tokem a má stejnou velikost, ale opačnou fázi jako síťové napětí U_1 . Stroj nevyvíjí žádný moment. Jedná se tedy o ideální chod naprázdno.

Tento případ je vidět na fázorovém diagramu zobrazeném na obr. 1.19 a. Je to stav idealizovaného asynchronního motoru, protože ve skutečnosti musí motor při chodu naprázdno hradit mechanické ztráty, ztráty v ložiskách a ztráty ventilační. Tyto ztráty představují určitý moment, který motor zatěžuje. Z toho důvodu nemůže motor nikdy dosáhnout synchronním otáčkám. Mimo jiné má skutečný motor při chodu naprázdno, také úbytek napětí a ztráty v mědi a železe. Ztrátám naprázdno pak odpovídá činná složka proudu naprázdno I_z . Elektromotorická síla E_1 je tedy menší než napětí U_1 o úbytky na činném odporu a reaktanci, viz obr. 1.19 b.

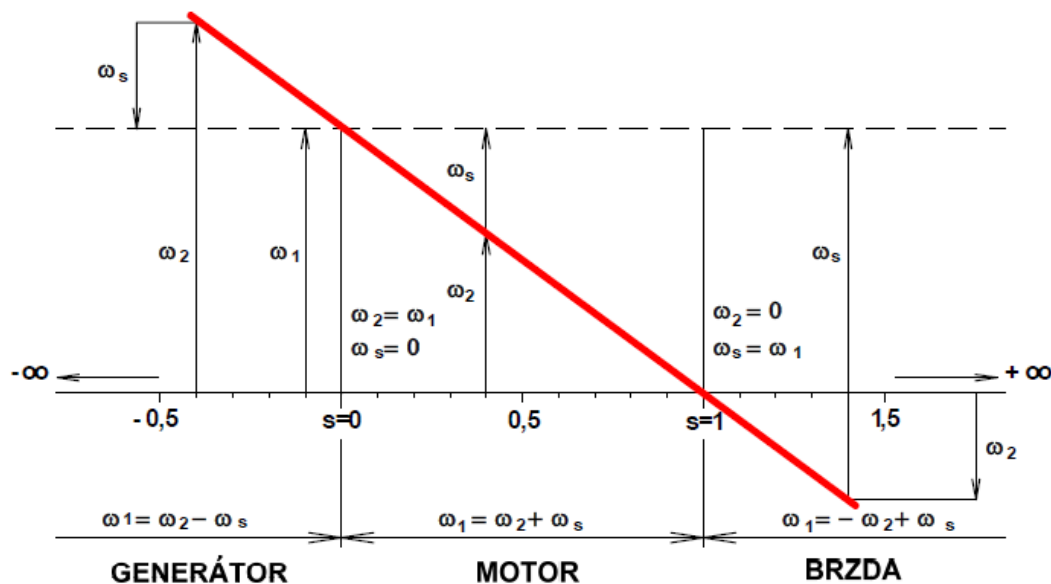
Stav motoru nakrátko nastane, když se rotor neotáčí. Otáčky jsou tedy nulové a skluz roven jedné. Rotorové vinutí je ale spojeno nakrátko. Poměry budou rozdílné oproti předchozímu popisu, kde rotor stál, a vinutí bylo rozpojené. Stav nakrátko se u motoru vyskytuje při jeho rozběhu, popřípadě při jeho zastavení vlivem přetížení. Na rozdíl od transformátorů má asynchronní motor mnohem větší rozptyl, protože má mnohem větší magnetický odpor. Navíc magnetický obvod motoru obsahuje vzduchovou mezeru. Při stavu nakrátko je téměř celý magnetický tok rozptylový, protože jen jeho malá část je potřebná k indukci elektromotorické síly. Ta je malá, jelikož je potřebná pouze na překonání úbytku napětí na činném odporu vinutí a jeho reaktanci. Proud nakrátko dosahuje nižších hodnot než u transformátorů, protože se nejedná o časovou změnu, nýbrž o změnu prostorovou vyvolanou točivým polem. Hodnota dosahuje $5 \div 7$ násobku jmenovitého proudu motoru. Všechna přivedená energie v tomto stavu je přeměněna na teplo. [2, s. 14-15]



obr. 1.19 Fázorový diagram a) ideální chod naprázdno, b) skutečný stav naprázdno [2, s. 14]

Provozní stav asynchronního motoru (obr. 1.20 motor) se nachází mezi jmenovanými stavy naprázdno a nakrátko. Aby indukované napětí v rotoru vyvolalo proud, který společně s točivým magnetickým polem vytvoří moment motoru na hřídeli, musí mít motor skluz. Skluz

se tedy pohybuje mezi $1 \geq s \geq 0$ a otáčky motoru mezi $0 \leq n \leq n_1$. Rychlost otáčení má stejný smysl jako točivé magnetické pole a skluz je kladný.



obr. 1.20 Pracovní stavy asynchronního stroje [1, s. 60]

Je-li rotor asynchronního stroje poháněn, tak že rychlost otáčení se zvýší nad synchronní otáčky, bude skluz záporný $s < 0$. Indukované napětí v rotoru změní smysl a elektrická energie může být dodávána zpět do sítě. Z asynchronního motoru se stane asynchronní generátor (obr. 1.20 generátor), ale aby mohl plnit funkci generátoru, musí mít k dispozici zdroj magnetizačního proudu.

Rotor, může být poháněn také tak, že se otáčí proti směru točivého magnetického pole. Poté je skluz kladný a větší než 1. Stroj koná odpor proti tomuto pohybu. Tento stav označujeme jako brzda (obr. 1.20 brzda). [1, s. 60]

1.5.2 Energetická bilance asynchronního stroje

Asynchronní stroj odebírá ze sítě činný příkon, který je

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi \quad (1.30.)$$

Ve stroji vznikají ztráty. Ztráty ve vinutí, které vznikají v primárním vinutí, jsou

$$\Delta P_{Cu1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (1.31.)$$

Dalšími ztrátami jsou ztráty v železe

$$\Delta P_{Fe} = m_1 \frac{U_1^2}{R_{Fe}} \quad (1.32.)$$

Vzduchovou mezerou je přenášen výkon ze statoru na rotor, tento výkon se nazývá výkon ve vzduchové mezeře a odpovídá

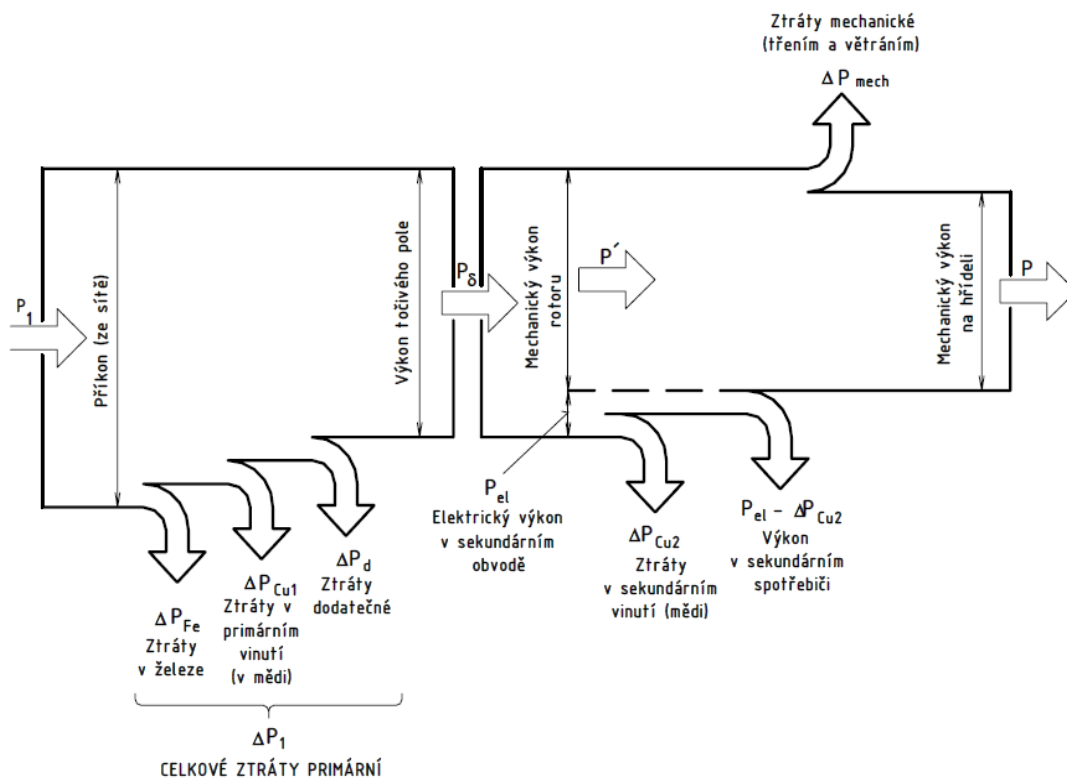
$$P_{\delta} = P_1 - (\Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_d) \quad (1.33.)$$

kde ΔP_d jsou ztráty přidavné ve statoru

Rozložení výkonových poměrů v asynchronním motoru je na obr. 1.21. Výkon ve vzduchové mezeře P_{δ} se dělí na mechanický výkon P' a elektrický výkon P_{el} . Elektrický výkon kryje ztráty ve vinutí rotoru P_{Cu2} a výkon předávaný připojenému spotřebiči k rotorovému vinutí, eventuálně vráceného zpět do sítě (podsynchronní kaskáda). Ztráty v železe rotoru jsou malé, a proto se obvykle zanedbávají. U motoru nakrátko je $P_{e1} = P_{Cu2}$. Užitečný výkon motoru na hřídeli.

$$P = P' - \Delta P_{mec h} \quad (1.34.)$$

kde $\Delta P_{mec h}$ jsou ztráty třením, ventilací a přidavné ztráty v rotoru.



obr. 1.21 Energetická bilance asynchronního motoru [2, s. 23]

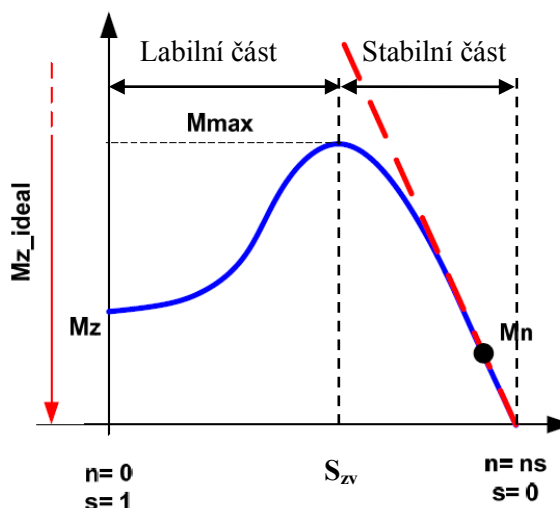
Poté můžeme odvodit účinnost motoru. [2, s. 22-23]

$$\eta = \frac{P}{P_1} \quad (1.35.)$$

1.5.3 Moment a momentová charakteristika

Hlavní provozní vlastnosti asynchronního motoru vyjadřuje momentová charakteristika. Moment asynchronního motoru je vytvořen vzájemným působením točivého magnetického pole, které je vybuzené mmf F_m , a rotorovými proudy. Moment otáčí rotorem ve směru otáčení tohoto magnetického pole, a čím je větší zatížení motoru, tím je větší moment. Čím je větší zatížení, tím klesají otáčky a rotor se více zpožďuje za točivým magnetickým polem statoru (narůstá skluz) a rotorovými tyčemi tečou větší proudy. Jestliže by v magnetickém obvodu motoru nevznikal rozptyl, tak by jeho moment byl úměrný okamžitému proudu v rotoru, tím pádem i okamžitému proudu ve statoru (proudu ze sítě).

Skluz stroje je největší, když je stroj v klidu, tzn. v okamžiku zapnutí. Stroj by tedy měl mít i největší točivý moment v okamžiku zapnutí, tzv. záběrný moment M_z . Naopak při synchronních otáčkách, kdy není hřídel stroje zatížena, má motor nejmenší moment. V tom případě by průběh momentu v závislosti na skluzu (otáčkách) vypadal jako přímka. Nicméně má točivý moment asynchronního stroje podobu křivky, viz obr. 1.22. Je to díky vlivu rozptylu, který je větší, čím je větší proud.



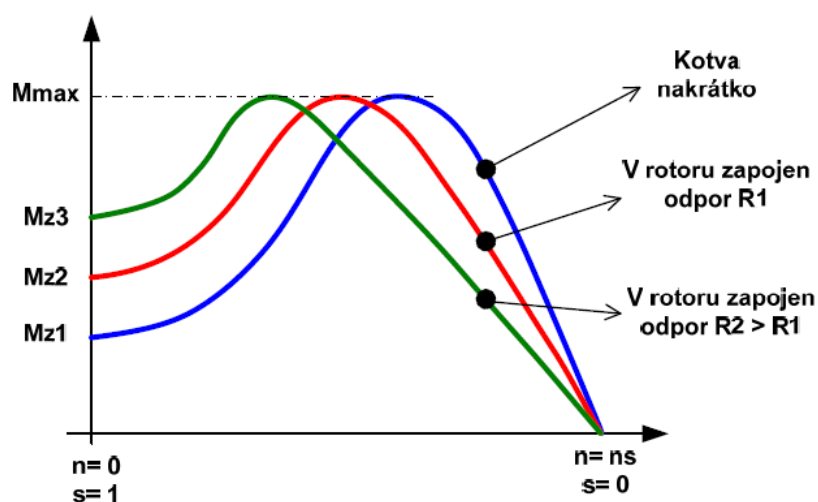
obr. 1.22 Průběh momentu asynchronního stroje v závislosti na skluzu [1, s. 61]

Vlivem rozptylu se při velkém proudu výsledný magnetický tok točivého magnetického pole zmenšuje. Když bude zmenšení magnetického toku menší než přírůstek proudu, tak točivý moment motoru poroste. Největšího momentu tzv. momentu zvratu M_{max} dosáhne motor při největším součinu magnetického toku a proudu. Tento moment je umístěn na vrcholu křivky znázorněné na obr. 1.22.

Jestliže dojde k překročení momentu zvratu, dojde vlivem rozptylu k většímu zmenšení magnetického toku než je zvětšení proudu a točivý moment se začne zmenšovat. Motor, který je zatížen větším momentem, než je moment zvratu začne rychle ztrácet otáčky a zastaví se. Tato část křivky je označována jako tzv. labilní část.

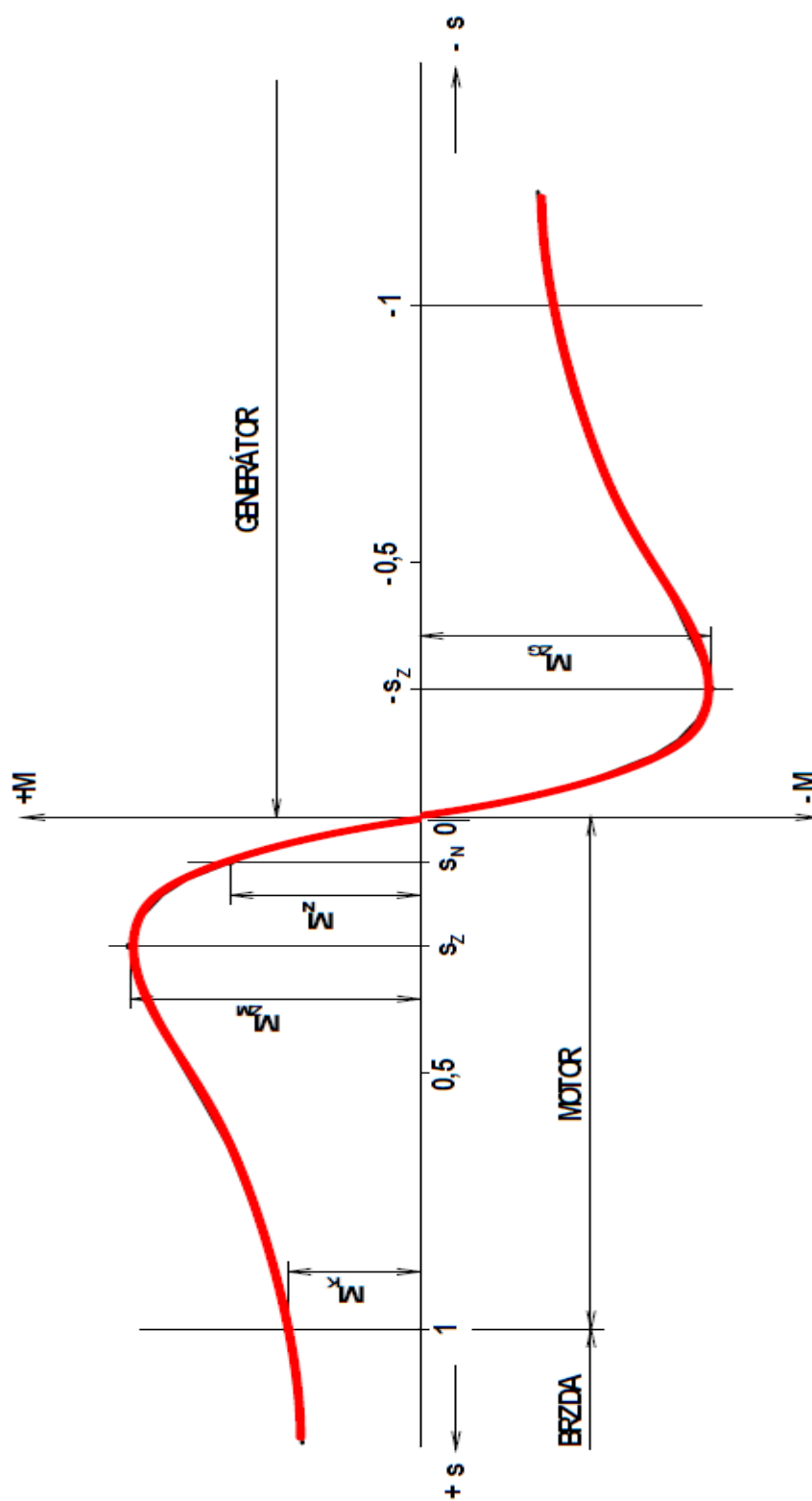
Jestliže bude mít rotorové vinutí menší odpor při daném zatížení motoru, tím bude menší skluz motoru. Tím se sníží i ztráty a zvýší se účinnost celého motoru. Nectností motorů s malým odporem rotoru je velikost záběrného proudu a díky většímu rozptylu dosahují menších záběrných momentů.

Čím bude větší odpor vinutí rotoru, tím bude menší rozptyl magnetického pole a tím se zvýší záběrný moment. Tohoto poznatku se využívá v praxi u kroužkových motorů, kdy se do rotorového vinutí přes kroužky připojí přídavný odpor. Nebo jak bylo řečeno v konstrukci, jsou provedeny rotory se speciální klecí kotvy nakrátko. U obou případů jde o velký odpor rotorového vinutí při rozběhu motoru a tím docílení velkého záběrného momentu při malém záběrném proudu. Naopak aby při vlastním běhu motoru byl malý odpor a dosahovalo se co nejvyšší účinnosti.



obr. 1.23 Změna záběrného momentu asynchronního motoru se zvyšujícím se odporem kotvy [1, s. 62]

Jelikož může asynchronní stroj pracovat jako motor, generátor nebo jako brzda, tak celá jeho momentová charakteristika je zobrazena na obr. 1.24. [1, s. 60-62]



obr. 1.24 Momentová charakteristika asynchronního stroje [1, s. 62]

2 Hybridní rotory asynchronních motorů s kotvou nakrátko

V předchozích kapitolách bylo popsáno konstrukční uspořádání a principy činnosti asynchronního stroje. V dnešní době zmíněná konstrukce asynchronních motorů nesplňuje požadavky na spotřebu elektrické energie při jejich provozu. Motory musí mít čím dál větší účinnost, která je dána směrnicemi EU, jak bude uvedeno dále. Z toho důvodu mnoho firem přistoupilo k vývoji nových řad motorů. Tento vývoj ovlivnil převážně konstrukci rotorových vinutí. Těmito úpravami se docílilo zvýšení účinnosti motorů a tím snížení spotřeby elektrické energie.

2.1 Směrnice EU 2009/125/ES a norma ČSN EN (IEC) 60034 - 30

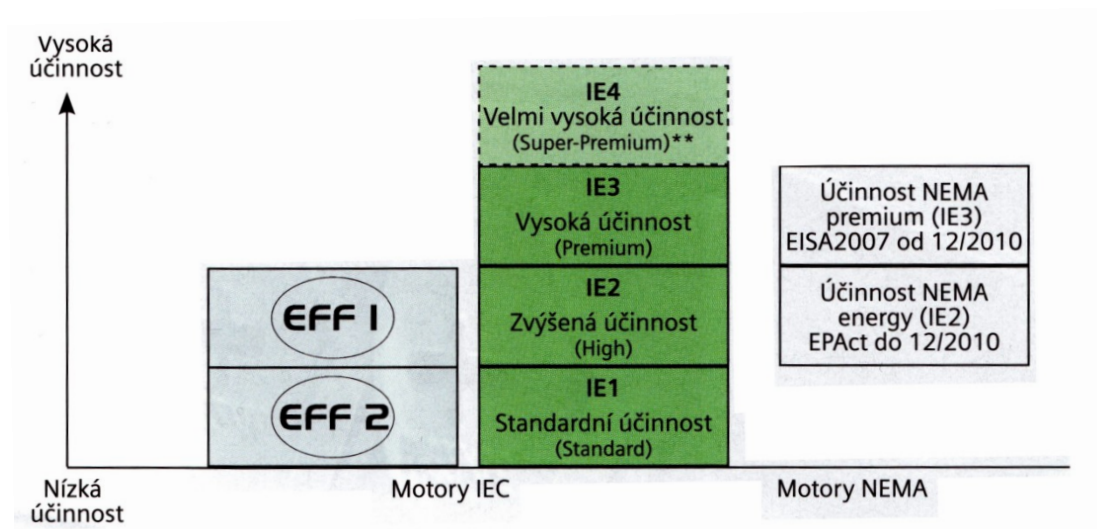
Udává nové definice a nové třídy účinností.

S cílem snížit spotřebu elektrické energie a tím i množství emisí CO₂, vypracovala Evropská unie legislativu, která se jím zabývá. Využitím energie a účinností u asynchronních motorů se zabývá směrnice EuP (Energy using product) část 11. Neboli směrnice EU 2009/125/ES.

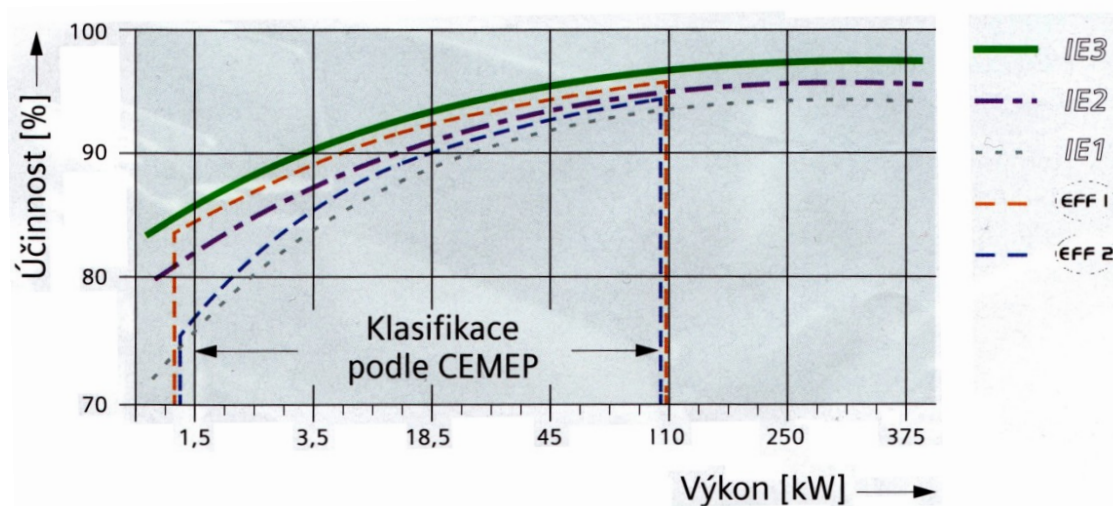
Norma ČSN EN (IEC) 60034 – 30 stanovuje třídy účinností u asynchronních motorů napájených ze sítě s kmitočtem 50 Hz a 60 Hz. Tato norma také stanovuje, na které motory se norma vztahuje a které jsou z ní vyjmuty. Nové třídy účinností jsou značeny IE (international efficiency) a norma je stanovuje následovně:

- IE1 standardní účinnost (Standard) – od června 2011 nesmí být dodávány na evropské trhy
- IE2 zvýšená účinnost (High)
- IE3 vysoká účinnost (premium)
- IE4 velmi vysoká účinnost (Super – Premium)

V dodatku nové nomenklatury se mění měřící metody používané pro stanovení účinností motorů. Nová norma IEC 60034 – 2 – 1 nestanovuje velikost přídatných ztrát na 0,5% příkonu, ale nepřímou se vypočítávají při měření. To má za následek celkové snížení nominálních účinností. Jinak řečeno, motory s účinností EFF1 se mění na IE2 a EFF2 na IE1, i když u nich nedochází k žádné fyzické nebo technické změně. [5]



obr. 2.1 Srovnání účinností EFF a IE [5]



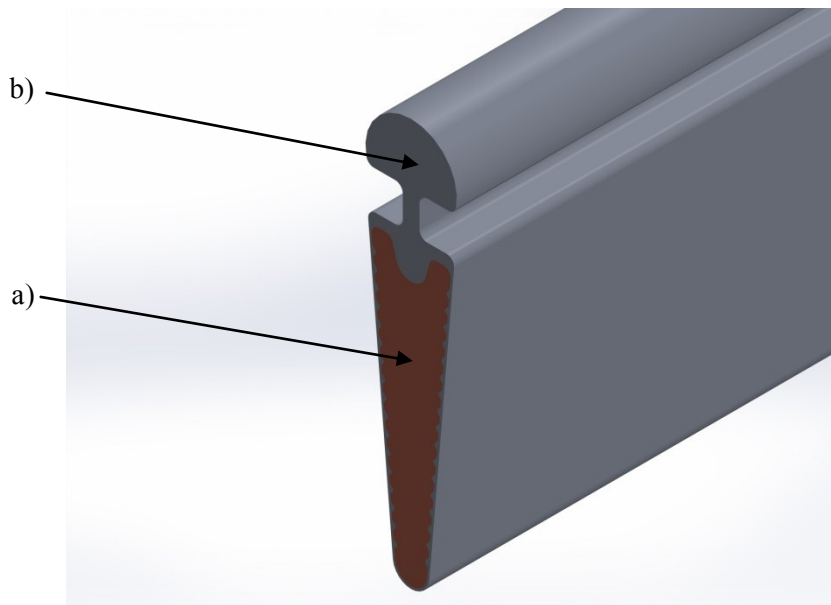
obr. 2.2 Rozsah účinností motorů IE a předchozí EFF [5]

2.2 Provedení hybridních rotorů

Rotorové vinutí asynchronních motorů nakrátko je nejčastěji provedeno tlakovým litím hliníku. Technologickou výhodou tohoto provedení je teplota tavení hliníku. Ten dosahuje teploty tavení při 660° C. Naproti tomu u rotorů odlévaných z mědi je potřeba teploty 1083° C.

Pro zhotovení rotorových klecí nakrátko z hliníku se užívá elektrovedného hliníku s čistotou 99,5%, kde jeho měrná hustota dosahuje 2,7 kg·dm⁻³. Rotory provedené z mědi jsou těžší, jelikož měď patří mezi těžké kovy a její měrná hustota je 8,9 kg·dm⁻³. Její výhodou je lepší vodivost, ta může být až o 35% vyšší než u hliníku a jeho slitin. [5, s. 17]

Podstatou výroby hybridních rotorů je využití těchto poznatků. Jde vlastně o kombinaci vlastností vírové a dvojité (Boucherotovy) klece nakrátko, kde první klec je tvořena měděnými tyčemi daného profilu, viz obr. 2.3 a, které jsou do rotorového svazku vkládány před tlakovým odléváním druhé klece z hliníku, viz obr. 2.3 b. Měděná tyč je pocínována, aby nedocházelo ke zvyšování přechodového odporu při přechodu proudu z mědi na hliník a naopak. Zkratovací kruhy vzniknou při odlévání druhé klece za pomoci odlévací formy a jsou taktéž provedeny z hliníku.



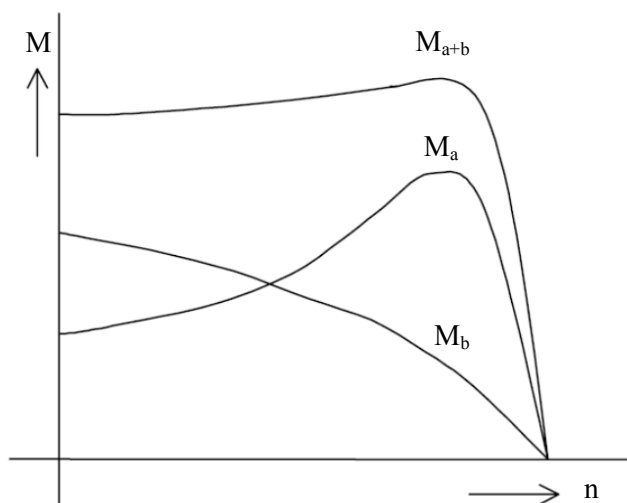
obr. 2.3 Řez dvojitou klecí rotoru a) první klec z mědi, b) druhá klec odlitá z hliníku

2.3 Vlastnosti motorů s hybridním rotorem

Volbou této konstrukce a použitých materiálů dosáhneme vyššího záběrného momentu s menším záběrným proudem a vyšší účinnosti při běhu motoru. Klec (obr. 2.3 b) má vyšší odpor než klec druhá (obr. 2.3 a). Proto při rozběhu, kdy je vysoká rotorová frekvence, bude pro impedanci rotorové tyče rozhodující reaktance.

$$X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (2.1.)$$

Vyšší reaktanci má klec, která je hlouběji v magnetickém obvodu rotoru. Proto při rozběhu poteče proud převážně vrchní odporovou klecí a rozběh proběhne jako by spodní klec neexistovala. Jakmile se motor rozběhne, nízká rotorová frekvence, začne o rozdělení proudu v klecích rozhodovat činný odpor. Reaktance se stane zanedbatelnou a rozhodující vliv na parametry motoru převeze spodní klec s nižším odporem. Motor se tedy bude chovat jako kroužkový motor s odpojeným přídavným odporem jak je znázorněno na obr. 1.23. Výsledná momentová charakteristika bude dána součtem charakteristik odporové klece a klece s malým odporem, jak je znázorněno na obr. 2.4. [7, s. 14]



obr. 2.4 Výsledná momentová charakteristika.

2.4 Změna vnitřní konstrukce hybridního rotoru

Úpravy byly prováděny na asynchronním motoru od firmy Siemens řady 1LE osově výšky 160.

Štítkové hodnoty pro 50Hz:

- Druh stroje – asynchronní motor
- Druh proudu – třífázový
- Jmenovitý výkon: 11 kW
- Jmenovité statorové napětí: 400/690 V
- Jmenovitý statorový proud: 20,5/12,0 A
- Jmenovitý kmitočet: 50 Hz
- Jmenovité otáčky: 1475 min⁻¹
- Jmenovitý účinník: 0,84
- Spojení statorového vinutí – D/Y
- Typ konstrukce – IMB3
- Stupeň krytí – IP55
- Druh chlazení – IC411

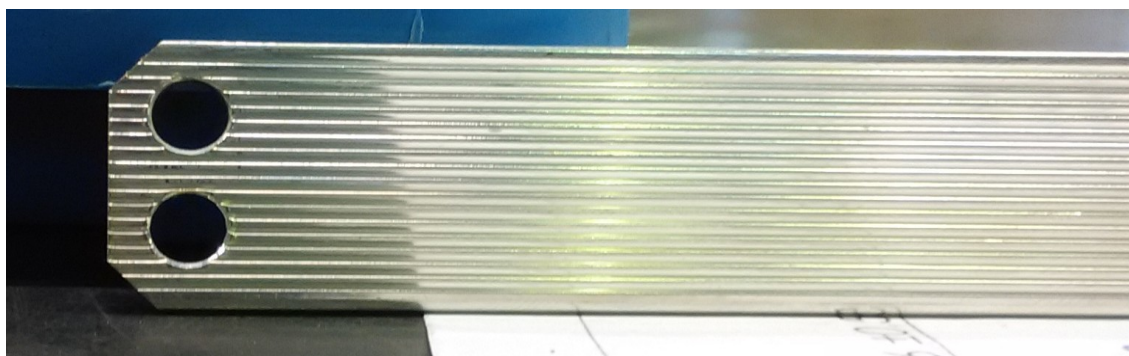
V rámci praktické části diplomové práce bylo provést úpravu vnitřní konstrukce hybridního rotoru. Tyto úpravy spočívaly ve změně tvaru vkládaných měděných tyčí. Pro tyto změny bylo provedeno celkem osm návrhů, ze kterých byly vybrány dvě varianty. Provedení úprav je patrné z výkresů, které jsou obsaženy v přílohách. Takto upravené rotory jsou dále popisovány jako MOT_1 a MOT_2.

Dalšími úpravami byly změny v počtu vložených měděných tyčí do rotorového svazku. Opět bylo vytvořeno několik variant (sedm), ze kterých byly vybrány tři způsoby provedení. Při

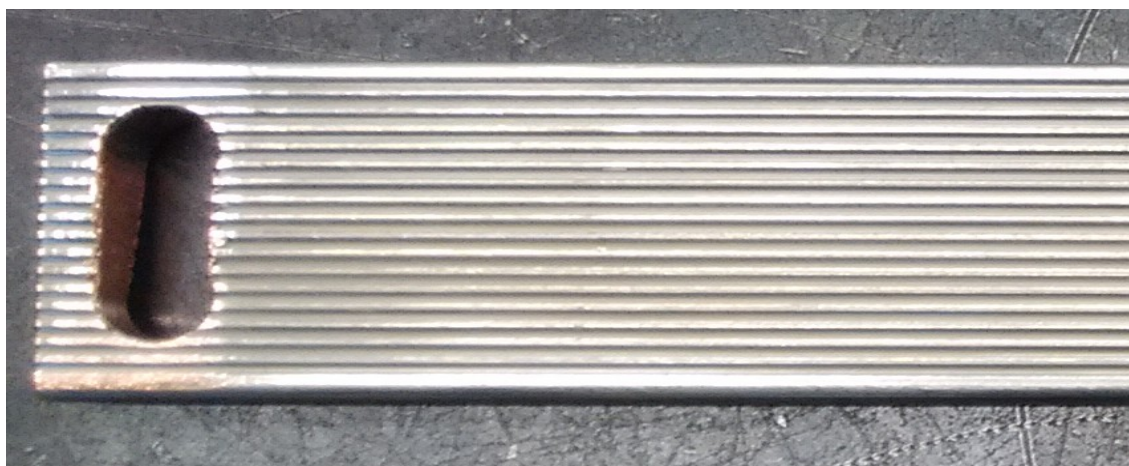
změně počtu vložených tyčí se muselo dbát na finální vyvážení rotorového svazku. V prvním provedení se jednalo o snížení počtu tyčí z 36, plné obsazení drážek, na polovinu, tj. na 18 vložených měděných tyčí. Označení motoru MOT_3. Pro druhou variantu byl počet vložených tyčí stanoven na 24. Označení MOT_4. Poslední z vybraných variant obsahuje 32 vložených tyčí. Označení MOT_5. Množství a místa uložení jednotlivých měděných tyčí je patrné z příloh. Počty byly voleny tak, aby při následujících měřeních bylo vidět, jak tyto úpravy ovlivňují parametry výsledného motoru.

Pro tyto úpravy byly v prototypové dílně firmy Siemens, s.r.o., odštěpný závod Elektromotory Mohelnice vyrobeny jednotlivé prototypy motorů. Bylo tedy vyrobeno celkem 5 kusů motorů. Ty byly následně ve zkušebně této firmy odměřeny a výsledky jednotlivých měření budou probírány v dalších kapitolách této diplomové práce.

Pro teoretickou představu, jak se budou měnit parametry stroje, převážně rozložení magnetické indukce, byly provedeny simulace v programu ANSYS Maxwell 16.0. Tyto simulace obsahovaly klasické provedení motoru a změnu počtu vložených tyčí pro provedení MOT_3. Výsledná rozložení magnetické indukce jsou uvedeny v příloze.



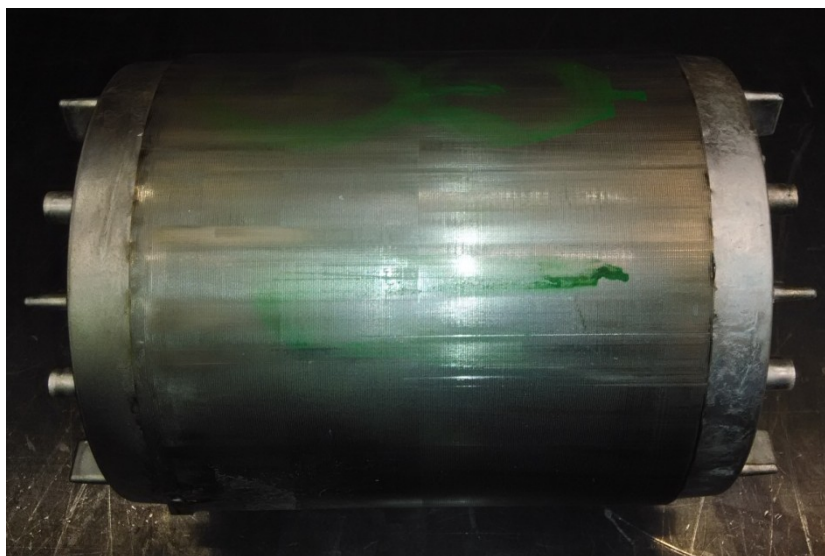
obr. 2.5 Upravená měděná tyč MOT_1, s galvanicky nanesenou vrstvou cínu



obr. 2.6 Upravená měděná tyč MOT_2, s galvanicky nanesenou vrstvou cínu



obr. 2.7 Odlitý rotor, provedení MOT_3





obr. 2.8 Odlitý rotor, provedení MOT_3

3 Měření asynchronního motoru

Vlastní měření probíhalo na pěti prototypch elektromotorů. Pro každý elektromotor byly vypracovány tři protokoly, tzn. tři měření. Ta se lišila ve štítkových hodnotách, jak udává následující tabulka 3.1. Celkem tedy bylo provedeno patnáct kompletních zkoušek, jejichž protokoly jsou z důvodu velkého množství dat obsaženy v elektronické příloze. V následující části bude uveden jeden z protokolů pro MOT_3, který bude popsán a na kterém bude nastíněn postup měření.

Tab. 3.1 Štítkové hodnoty jednotlivých elektromotorů

ŠTÍTKOVÉ HODNOTY											
		P ₂	U _N	I _N	cosφ _N	T	η	f	n	zpoj.	
		(kW)	(V)	(A)	(-)	(Nm)	(%)	(Hz)	(min ⁻¹)		
Upravené tyče	MOT_1		11	400	20,5	0,84	71,14	91,4	50	1475	D
			12,6	460	20	0,85	67,77	92,4	60	1770	D
			11	460	18	0,83	59,06	92,4	60	1775	D
	MOT_2		11	400	20,5	0,84	71,11	91,4	50	1475	D
			12,6	460	20	0,85	67,77	92,4	60	1770	D
			11	460	18	0,83	59,05	92,4	60	1775	D
Počty vložených tyčí	MOT_3	18-tyčí	11	400	20,5	0,84	71,13	91,4	50	1475	D
			12,6	460	20	0,85	67,92	92,4	60	1770	D
			11	460	18	0,83	58,84	92,4	60	1775	D
	MOT_4	24-tyčí	11	400	20,5	0,84	71,33	91,4	50	1475	D
			12,6	460	20	0,85	67,88	92,4	60	1770	D
			11	460	18	0,83	59,14	92,4	60	1775	D
	MOT_5	32-tyčí	11	400	20,5	0,84	71,4	91,4	50	1475	D
			12,6	460	20	0,85	67,87	92,4	60	1770	D
			11	460	18	0,83	59,15	92,4	60	1775	D

Tab. 3.2 Štítkové hodnoty MOT_3

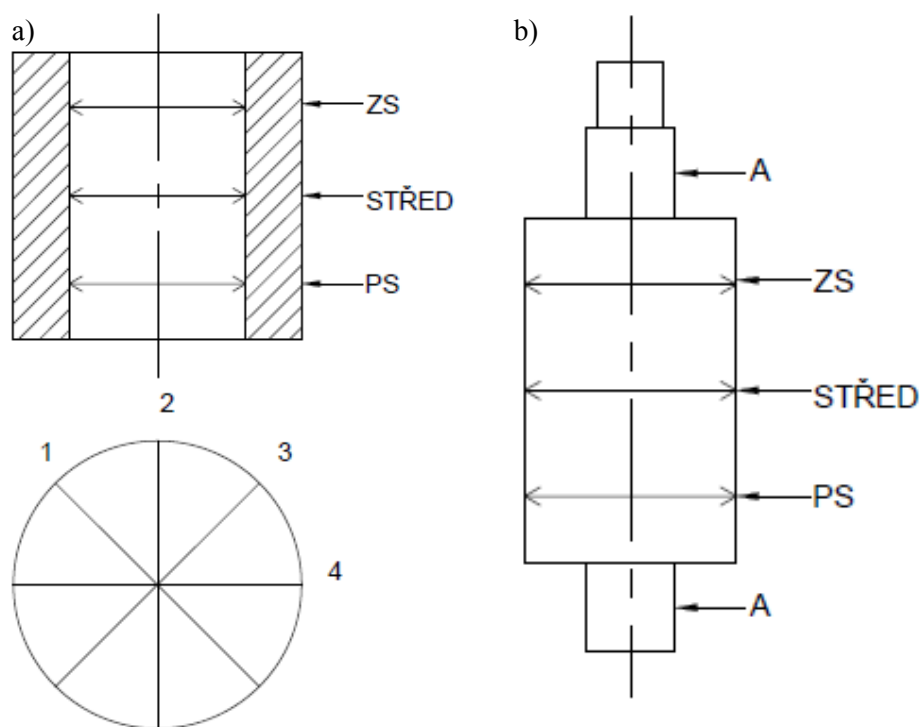
Výkon	11,00kW	Poznámka:			
Napětí	400,0V	Frekvence	50,00Hz	Teplotní třída	F
Proud	20,50A	Otáčky	1475/min	Typ konstrukce	IMB3
Účinník	0,840	Počet pólů	4	Krytí	IP55
Moment	71,13Nm	Zatížení	S1	Osová výška	160M
Účinnost	91,40%	Zapojení	D	Maximální teplota okolí	40,00°C
Třída účinnosti	IE3, Nema Premium				

3.1 Základní mechanická kontrola

Mechanická kontrola je důležitá z důvodu ověření vlastností vyrobených částí. Měří se rozměry statoru, rotoru a vzduchové mezery. Za předpokladu, že by nebyly jednotlivé součásti vyrobeny v předepsaných tolerancích, došlo by ke změně rozměrů vzduchové mezery, což by vedlo k neschopnosti splnit předepsané vlastnosti motoru (výkon a účinnost).

Měření probíhá za pomoci kalibrovaných měřidel v určených místech a naměřené hodnoty se srovnávají s předepsanými. [11]

Měření byla provedena v bodech dle obr. 3.1, kde ZS – zadní strana, PS – přední strana. Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulky 3.3 a 3.4. Naměřené rozměry statoru a rotoru vyhovují předepsaným hodnotám a elektromotor může být podroben dalším zkouškám.



obr. 3.1 Místa měření a) stator, b) rotor

Tab. 3.3 Mechanická kontrola statoru

STATOR	průměr statoru v setinách mm					předepsáno	naměřeno
místo měř.	1	2	3	4	délka statoru	155	155,5
ZS	-1	-1	1	2	zalisování	A=40	40,6
STŘED	1	1	3	4	PS - výška čela	70	65
PS	1	2	2	3	ZS - výška čela	77	67
střední průměr statoru			155,015		Průměr statoru	155	155,015

Tab. 3.4 Mechanická kontrola rotoru

ROTOR	průměr rotoru		Házení rotoru k A			Před.	Nam.
	Předepsáno	Naměřeno	Předepsáno	Naměřeno			
ZS STŘED PS	154	154,01	Do průměru 135mm-0,025mm Nad průměr 135mm-0,05mm	0,03	délka rotoru zalisování úhel natoč. počet drážek	155	155,2
	154	154,025		0,03		L1=69	69,2
	154	154,016		0,03		L=92,5	
střední prům. rotoru		154,017				7,5	
vzduchová mezera v mm			předepsáno	naměřeno	odchylka (%)	36	
			0,5	0,5	0,2		

3.2 Měření činného odporu vinutí

Odpor vinutí se měří můstkem (Wheatstonův nebo Thomsonův), ohmmetrem nebo ohmovou metodou. Odpor vinutí se udává pro teplotu +20 °C. Pokud je odpor měřen při jiné teplotě, tak se přepočítává podle vzorce. Pro měď platí konstanta 235 a pro hliník 225.

$$R_{20} = R \cdot \frac{235 + 20}{235 + v} \quad (3.1.)$$

kde R_{20} odpor vinutí při 20 °C v Ω
 R odpor vinutí při teplotě v v Ω
 v teplota vinutí při měření ve °C

Při měření můžeme považovat teplotu vinutí za teplotu okolí za předpokladu, že denní výkyvy teploty nejsou větší než 5 °C a neohřátý stroj je v daném prostředí alespoň 8 hodin. Pokud nesplníme tyto podmínky, je potřeba změřit teplotu vinutí vhodným způsobem s přesností 0,5 °C. Měřicí proud nesmí ohřívat vinutí. V normě je doporučeno měřit proudem rovným maximálně 10 – 20% jmenovitého proudu měřeného vinutí. Odpor vinutí statoru se měří na koncích vinutí.

Měření odporu vinutí se provádí před započetím zkoušek, při měření naprázdno a po oteplovací zkoušce. Přičemž při měření naprázdno hodnota odporu odpovídá aritmetickému průměru naměřených hodnot. Při oteplovací zkoušce norma předepisuje změření odporu v době 0s, 30s, 90s a 120s po skončení. Měření probíhá v pořadí L_1 , L_2 , L_3 a opět L_1 , charakteristika je vytvořena extrapolací naměřených hodnot. Norma doporučuje měření odporu každé fáze třikrát. Skutečná hodnota odporu je aritmetickým průměrem naměřených hodnot. [8, s. 9-12], [11]

Odpor za studena byl měřen při teplotě 19,20°C. Každé měření bylo provedeno třikrát a byla zaznamenána výsledná střední hodnota pro každé vinutí. Z těchto hodnot byl vypočten aritmetickým průměrem výsledný odpor R_s za studena. Přičemž tato hodnota byla dále přepočtena na odpovídající teploty 20 a 25°C.

Tab. 3.5 Odpor vinutí – za studena

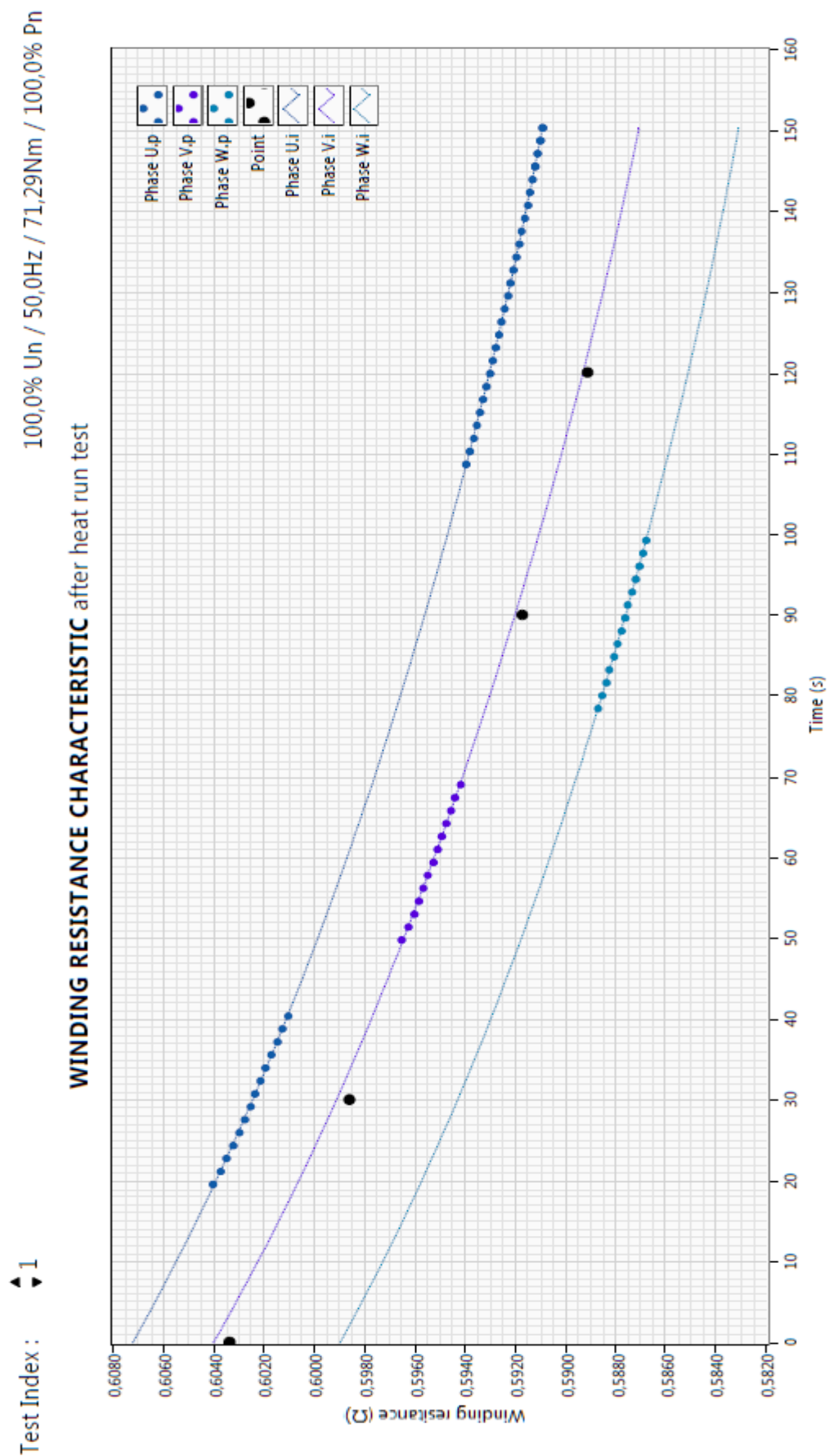
R_s U-V (Ω)	0,5102	R_s (Ω)	0,5068
R_s V-W (Ω)	0,5069	R_s (Ω) na 25°C	0,5184
R_s W-U (Ω)	0,5033	R_s (Ω) na 20°C	0,5084
Symetrie (%)	1,38		

Odpor vinutí po ukončení oteplovací zkoušky byl měřen v intervalech 30, 90 a 120s. hodnoty byly zaznamenány do tabulky a extrapolací vytvořena charakteristika odporu jednotlivých vinutí v závislosti na čase. Měření je provedeno dle IEC, IEEE a CSA. Příklad přepočtu pro IEC je uveden v protokolu.

Tab. 3.6 Odpor vinutí při teplotě okolí 21,64°C

	IEC				IEEE			
	0s	30s	90s	120s	0s	30s	90s	120s
Teplota okolí (°C)	21,640	21,640	21,640	21,640	21,640	21,640	21,640	21,640
Odpor U-V (Ω)	0,6072	0,5956	0,5956	0,5930	0,6072	0,6025	0,5956	0,5930
Nárůst teploty U-V (K)	45,885	40,095	40,095	38,808	45,790	43,420	40,012	38,727
Odpor V-W (Ω)	0,6040	0,5920	0,5920	0,5893	0,6040	0,5991	0,5920	0,5893
Nárůst teploty V-W (K)	46,254	40,236	40,236	38,876	46,159	43,709	40,152	38,795
Odpor W-U (Ω)	0,5990	0,5876	0,5876	0,5851	0,5990	0,5943	0,5876	0,5851
Nárůst teploty W-U (K)	45,893	40,155	40,155	38,894	45,798	43,439	40,071	38,812
Průměrný odpor (Ω)	0,6034	0,5917	0,5917	0,5892	0,6034	0,5986	0,5917	0,5892
Průměrný nárůst teploty (K)	46,011	40,162	40,162	38,859	45,916	43,523	40,078	38,778
Teplota vinutí (°C)	64,6530	61,8040	61,8040	60,5020	67,5580	65,1650	61,7200	60,4200

CSA			
0s	30s	90s	120s
21,640	21,640	21,640	21,640
0,6072	0,6025	0,5953	0,5930
45,790	43,420	40,012	38,727
0,6040	0,5991	0,5920	0,5893
46,159	43,709	40,152	38,795
0,5990	0,5943	0,5876	0,5851
45,798	43,439	40,071	38,812
0,6034	0,5986	0,5917	0,5892
45,916	43,523	40,078	38,778
67,5580	65,1650	61,7200	60,4200



obr. 3.2 Charakteristika poklesu odporu vinutí po oteplovací zkoušce

3.3 Měření naprázdno

Při měření naprázdno se provádí měření proudu a ztrát naprázdno. Měření se provádí při nezátíženém motoru a v ustáleném stavu a to včetně ložiskových uzlů. Pokud není možné přímé změření teploty ložisek, tak se doporučuje motor naprázdno na určitou dobu zaběhnout. Doba zaběhnutí pro jmenovité otáčky a odpovídající výkon je uvedena tabulkou 3.7.

Tab. 3.7 Časy záběhu motoru dle výkonu

Výkon motoru (kW)		Čas záběhu (min)	
nad	do	Při typových zkouškách motorů s kluznými nebo valivými ložisky	Při kontrolních zkouškách s valivými ložisky
	1	10	3
1	10	30	3
10	100	60	3
100	1000	120	30
1000		180	60

Při zkoušce se měří ve všech fázích napětí, proud a příkon. Je-li k měření proudu a výkonu naprázdno použit měřicí transformátor proudu, tak musí mít třídu přesnosti alespoň 0,2. Charakteristiku naprázdno získáme postupným snižováním napětí. To budeme snižovat od hodnoty 1,3 násobku jmenovitého napětí až po hodnotu cca 0,2 – 0,3 násobku tohoto napětí. Spodní hodnota napětí odpovídá velikosti proudu, kdy ještě není pozorovatelné zvýšení satorového proudu. Je doporučeno změřit devět až jedenáct bodů při různých hodnotách napětí. Ihned po dokončení zkoušky naprázdno, je nutno změřit odpor satorového vinutí, jelikož ten je potřebný pro určení ztrát naprázdno satorového vinutí. Výsledné napětí U_1 a proud naprázdno I_0 se určí aritmetickým průměrem z naměřených hodnot. Příkon naprázdno P_0 je dán algebraickým součtem jednotlivých hodnot fázových výkonů. Účinník naprázdno se vypočte podle:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_0} \quad (3.2.)$$

kde P_0 příkon naprázdno ve W
 U_1 vstupní napětí naprázdno mezi přívody ve V
 I_0 vstupní proud naprázdno v přívodech v A

Ztráty naprázdno ΔP_0 jsou dány ztrátami ve satorovém vinutí ΔP_s , ztrátami v železe ΔP_{fe} a ztrátami mechanickými ΔP_{fw} .

Ztráty ve satorovém vinutí:

$$\Delta P_s = 1,5 \cdot I_0^2 \cdot R \quad (3.3.)$$

kde I_0 vstupní proud v přívozech naprázdno v A

R odpor statorového vinutí při teplotě zkoušky naprázdno v Ω

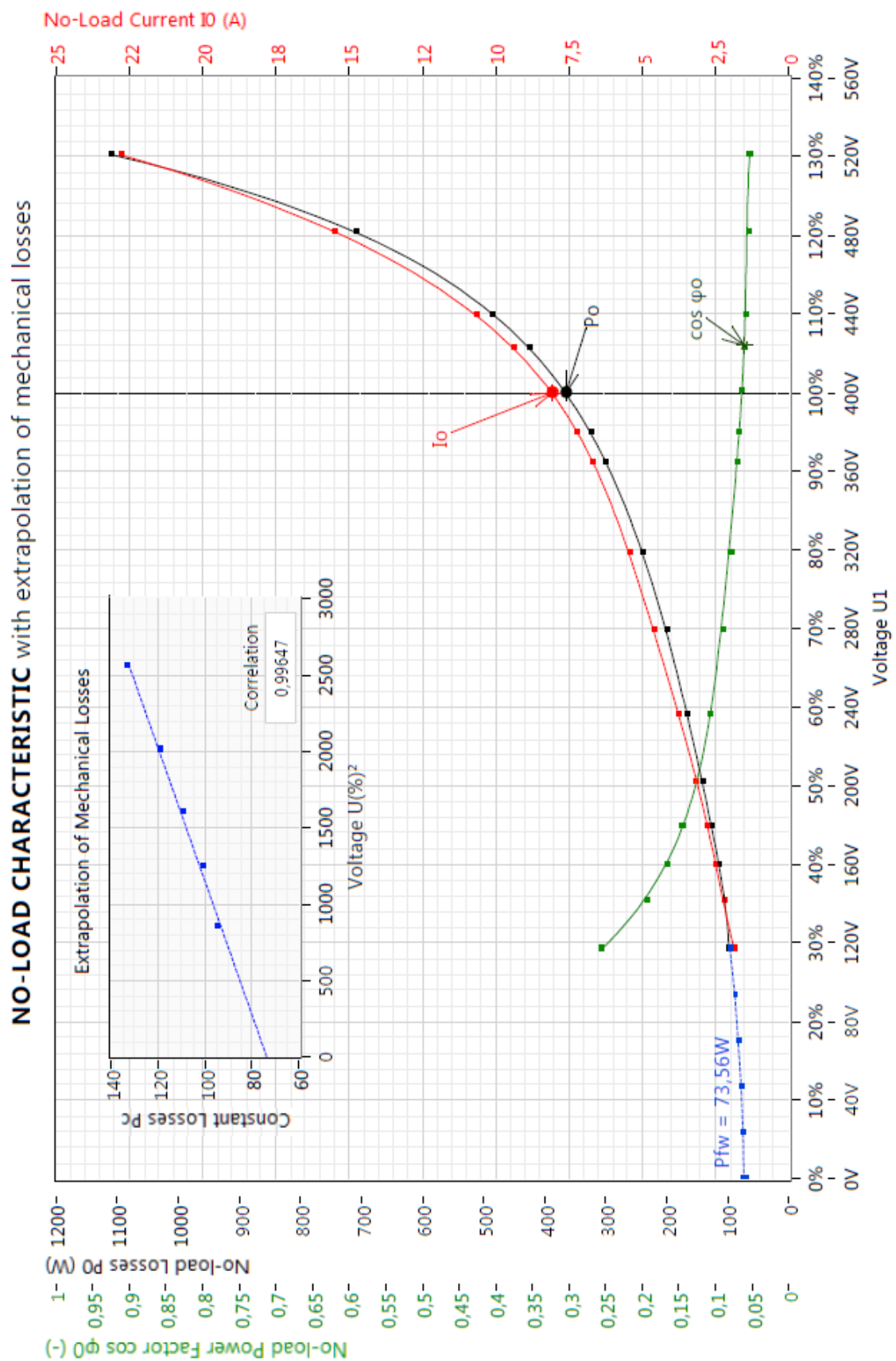
Pro motory, které mají různý odpor jednotlivých fází se za R_{10} dosazuje aritmetický průměr těchto fázových odporů. Při oddělení ztrát mechanických od ztrát v železe je třeba počítat s tím, že při snížení napětí se mohou celkové ztráty zvětšovat s narůstajícím skluzem a to převážně u vysokootáčkových motorů. Z toho důvodu se doporučuje sestavit přímku závislosti součtu ztrát v železe a ztrát mechanických a extrapolovat ji do průsečíku s osou souřadnic. Úsečka pak na této ose určuje mechanické ztráty motoru.

Ve výsledcích měření naprázdno (graf) se vynášejí hodnoty proudu naprázdno I_0 , příkonu naprázdno P_0 , ztrát mechanických ΔP_{fw} a účinníku naprázdno $\cos\varphi_0$ v závislosti na napětí naprázdno U_1 nejčastěji udávaného v %. [8, s. 12-13], [11]

V tabulce 3.8 jsou uvedeny hodnoty z měření naprázdno podle CSA C390-10. Tabulka obsahuje vypočtené ztráty v železe, ve vinutí a konstantní ztráty, ze kterých dle schématu na straně 5 v protokolu, lze vypočíst ztráty mechanické. Odpor a teplota jsou stanoveny z interpolace odporu vinutí před a po oteplovací zkoušce.

Tab. 3.8 Měření naprázdno s naměřenými a vypočtenými hodnotami

U_1 (%)	U_1 (V)	U_u (V)	U_v (V)	U_w (V)	I_0 (A)	I_u (A)	I_v (A)	I_w (A)	P_0 (W)	ΔP_s (W)	ΔP_c (W)	ΔP_{fe} (W)	$\cos\varphi_0$ (-)	R (Ω)	f (Hz)	θ_s ($^{\circ}\text{C}$)
130,3	521,3	521,8	520,1	522,0	22,80	22,53	22,78	23,07	1109	457,7	651,3	577,7	0,054	0,5872	50,00	24,15
120,4	481,7	482,2	480,7	482,3	15,50	15,29	15,53	15,67	709,0	211,5	497,5	423,9	0,055	0,5872	50,00	24,15
110,0	439,8	440,2	438,9	440,4	10,65	10,46	10,73	10,77	485,0	99,99	385,0	311,4	0,060	0,5872	50,00	24,08
100,3	401,1	401,3	400,3	401,7	8,15	8,01	8,22	8,23	367,0	58,52	308,5	234,9	0,065	0,5871	50,01	24,07
91,24	365,0	365,1	364,2	365,5	6,72	6,61	6,78	6,78	301,0	39,78	261,2	187,7	0,071	0,5871	50,00	24,10
79,70	318,8	319,0	318,1	319,3	5,45	5,37	5,51	5,46	240,0	26,11	213,9	140,3	0,080	0,5870	50,00	24,10
69,95	279,8	280,0	279,2	280,3	4,60	4,55	4,65	4,59	201,0	18,59	182,4	108,8	0,090	0,5870	49,99	24,09
59,10	236,4	236,6	235,8	236,8	3,76	3,74	3,81	3,74	167,0	12,46	154,5	80,98	0,108	0,5870	49,99	24,07
50,64	202,6	202,7	202,1	202,8	3,17	3,16	3,20	3,14	142,0	8,825	133,2	59,61	0,128	0,5869	49,99	24,09
40,06	160,2	160,4	159,9	160,4	2,48	2,48	2,51	2,46	115,0	5,414	109,6	36,02	0,167	0,5869	50,00	24,09
29,32	117,3	117,4	117,0	117,4	1,88	1,88	1,90	1,85	98,00	3,104	94,90	21,33	0,257	0,5868	50,01	24,06



obr. 3.3 Charakteristika měření naprázdno s extrapolací mechanických ztrát

3.4 Měření nakrátko

Při měření nakrátko určujeme proud a ztráty nakrátko. Při této zkoušce měříme vstupní napětí, proudy v jednotlivých fázích a příkon motoru. Měření je doporučeno provádět v tepelném stavu stroje, který odpovídá přibližně jmenovitému oteplení při $U_k = 100\% U_N$. Aby bylo možné určit ztráty nakrátko, je po skončení měření naprázdno změřen odpor statorového vinutí.

Při zkoušce nakrátko je rotor motoru zabrzděn a na statorové vinutí je přivedeno snížené napětí. Napětí se zvýší na zvolenou hodnotu a po jejích odečtení se motor ihned vypne. Je doporučeno měřit šest až osm bodů při různých hodnotách napětí. Odečtení se provádí okamžitě po ustálení hodnot na měřicích přístrojích, aby nedocházelo k nadměrnému ohřátí vinutí proudem nakrátko. Účinník nakrátko je vypočten dle rovnice 3.4.

$$\cos\varphi_A = \frac{P_A}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_A} \quad (3.4.)$$

kde P_A příkon nakrátko ve W

U_1 vstupní napětí naprázdno mezi přívody ve V

I_A vstupní proud nakrátko v přívodech v A

Hodnoty proudu nakrátko I_A , příkonu nakrátko P_A , momentu nakrátko T_A a účinníku nakrátko $\cos\varphi_A$ jsou graficky zobrazeny ve výsledku. Jednotlivé průběhy jsou vynášeny v závislosti na napětí nakrátko U_k , obvykle vynesené v %. [8, s. 14], [11]

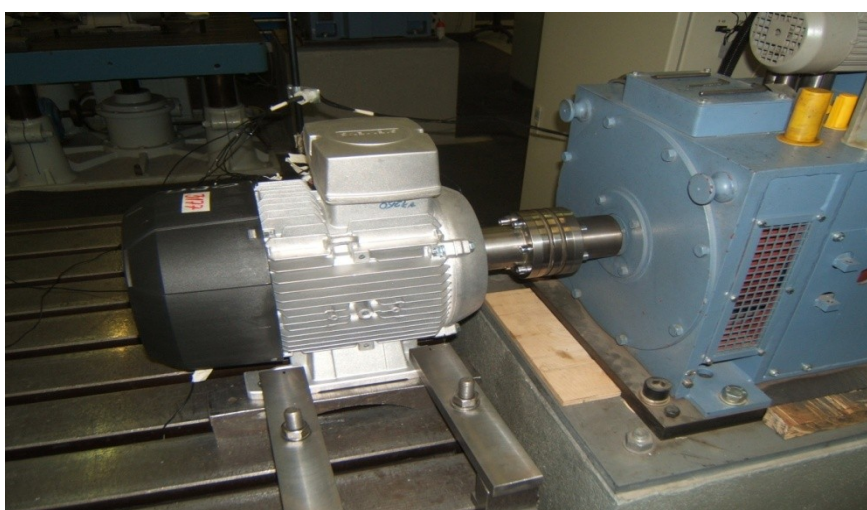
Měření je provedeno od 20 do 130% U_1 po 5 procentních přírůstcích. Přičemž hodnoty jsou měřeny pouze do 80% U_1 , jinak by mohlo dojít k poškození měřeného stroje. Zbýlé hodnoty do 130% U_1 jsou extrapolovány, jak je možno vidět v následující tabulce a grafu.

Tab. 3.9 Měření nakrátko, část 1.

U_k %	U_1 (V)	U_u (V)	U_v (V)	U_w (V)	I_A (A)	I_u (A)	I_v (A)	I_w (A)	P_A (W)	T_A (Nm)	$\cos\varphi_A$ (-)
19,01	76,05	76,19	75,80	76,15	19,91	20,02	19,71	20,01	1050	2,101	0,4003
24,62	98,50	98,70	98,17	98,63	27,18	27,33	26,87	27,33	1940	5,253	0,4184
29,66	118,6	118,8	118,3	118,8	33,86	34,08	33,48	34,03	3008	8,404	0,4323
34,23	136,9	137,2	136,4	137,2	40,10	40,34	39,64	40,32	4226	12,21	0,4408
39,30	157,2	157,4	156,6	157,5	47,17	47,47	46,62	47,42	5820	16,81	0,4532
48,59	194,3	194,7	193,7	194,7	60,66	61,09	59,92	60,97	9564	27,31	0,4684
57,60	230,4	230,7	229,6	230,9	74,36	74,89	73,44	74,75	14260	39,92	0,4803
64,10	256,4	256,9	255,4	257,0	84,50	85,12	83,44	84,97	18260	50,42	0,4867
73,19	292,8	293,0	291,6	293,6	99,53	100,2	98,24	100,1	24950	67,23	0,4943
78,94	315,8	316,2	314,4	316,7	109,3	110,1	107,9	110,0	29890	78,79	0,5000
85,00	340,0	---	---	---	119,8	---	---	---	35170	92,23	0,5052
90,00	360,0	---	---	---	128,7	---	---	---	40000	104,1	0,5097
95,00	380,0	---	---	---	137,8	---	---	---	45160	116,6	0,5141

Tab. 3.10 Měření nakrátko, část 2.

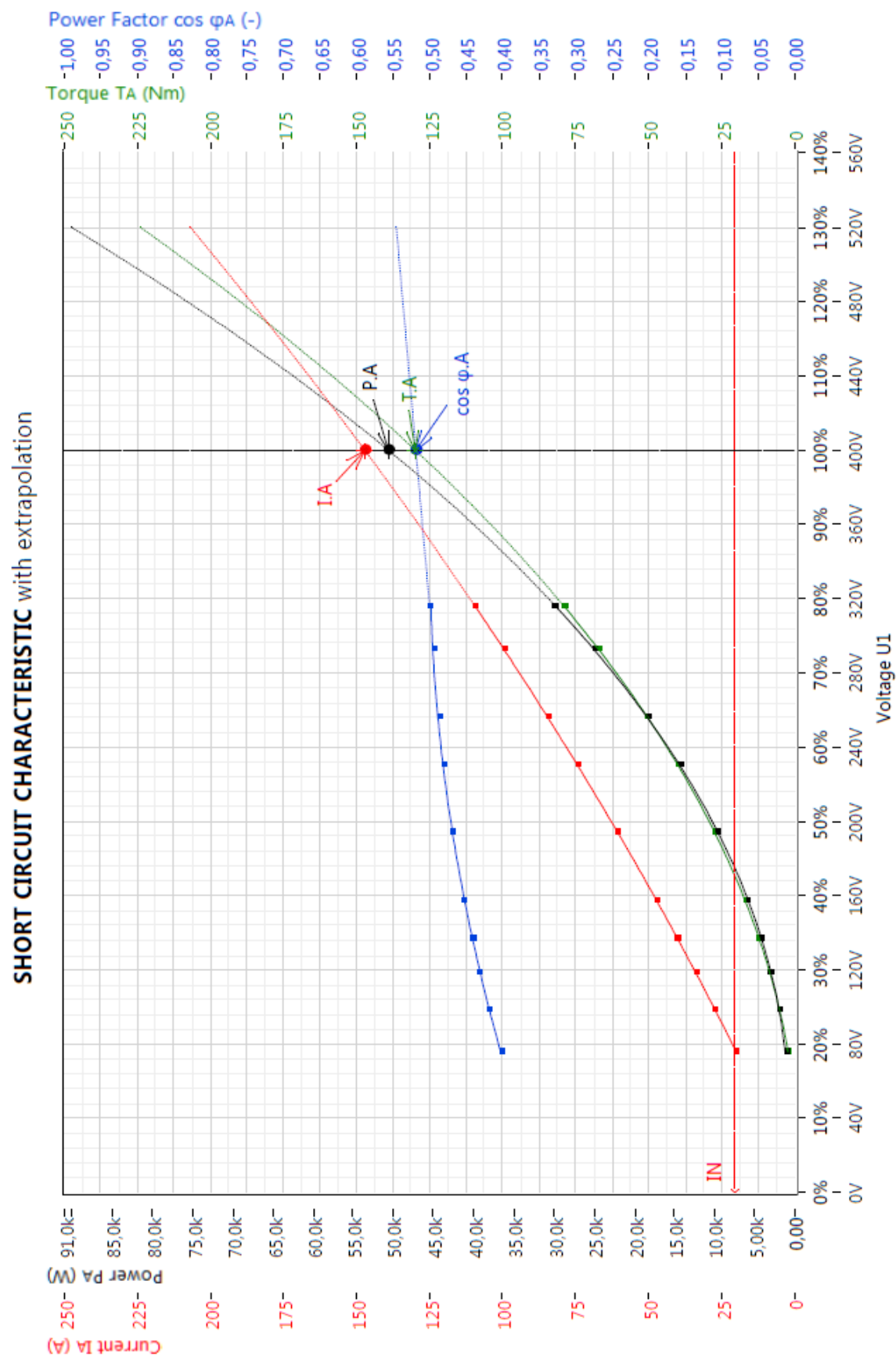
U _k %	U ₁ (V)	U _u (V)	U _v (V)	U _w (V)	I _A (A)	I _u (A)	I _v (A)	I _w (A)	P _A (W)	T _A (Nm)	cosφ _A (-)
100,0	400,0	---	---	---	147,1	---	---	---	50630	129,8	0,5186
105,0	420,0	---	---	---	156,6	---	---	---	56410	143,7	0,5231
110,0	440,0	---	---	---	166,3	---	---	---	62520	158,4	0,5275
115,0	460,0	---	---	---	176,1	---	---	---	68950	173,7	0,5320
120,0	480,0	---	---	---	186,2	---	---	---	75690	189,8	0,5365
125,0	500,0	---	---	---	196,4	---	---	---	82750	206,5	0,5409
130,0	520,0	---	---	---	206,8	---	---	---	90130	224,0	0,5454



obr. 3.4 Spojení elektromotoru s dynamometrem



obr. 3.5 Měřicí stanoviště



obr. 3.6 Charakteristika měření nakrátko s extrapolovanými průběhy

3.5 Měření zatěžovacích charakteristik

Z důvodu kontroly účinnosti, účinníku a skluzu se měří zatěžovací charakteristiky. Jsou to závislosti příkonu, účinníku, účinnosti a proudu na výkonu při konstantním vstupním napětí a kmitočtu, nebo na napětí při konstantním momentu. Měření probíhá v pěti až sedmi bodech, nejméně od 110% jmenovitého zatížení až do chodu naprázdno při ustáleném oteplení. Teplota tedy odpovídá teplotě při normálních pracovních podmínkách stroje. Skluz je určen pomocí synchronních a aktuálně naměřených otáček podle rovnice 1.12. Účinník je vypočten následujícím vztahem:

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1} \quad (3.5.)$$

kde P_1 příkon naprázdno ve W
 U_1 vstupní napětí naprázdno mezi přívody ve V
 I_1 vstupní proud v přívodech v A

Výsledkem měření zatěžovacích charakteristik je grafické vynesení vstupního proudu I_1 , skluzu s , účinnosti η , účinníků $\cos\varphi_1$ a příkonu P_1 v závislosti na výkonu P_2 při konstantním napětí (odpovídá U_N) nebo v závislosti na napětí U_1 při konstantním momentu. [8, s. 15], [11]

Měření bylo provedeno jak při konstantním napětí, tak při konstantním momentu. Pro konstantní napětí bylo měření provedeno v osmi bodech. Naměřené hodnoty jsou obsaženy v tabulce 3.11 a 3.12. Při konstantním napětí bylo provedeno také měření dle IEC (odečítají se ztráty) a tyto naměřené a přepočtené hodnoty jsou v tabulce 3.13. Výsledná charakteristika je vidět na obr. 3.7. Měření s konstantním momentem bylo provedeno v sedmi bodech a je uvedeno v tabulce 3.14 a 3.15. Charakteristika je vidět na obr. 3.8.

Tab. 3.11 Zatěžovací charakteristiky s naměřenými a vypočtenými hodnotami, konstantní napětí část 1.

P2 %	U1 (V)	I1 (A)	P1 W	n (1/min)	s (%)	T (Nm)	cos φ (-)	ΔPt (W)	P2 (W)	η (%)
25,3	401,3	9,62	3260,0	1493,8	0,402	17,82	0,491	473,6	2786,4	85,471
50,6	400,1	12,61	6186,0	1487,5	0,828	35,71	0,708	624,9	5561,1	89,898
75,6	400,5	16,48	9109,0	1482,0	1,232	53,59	0,797	794,4	8314,6	91,279
99,9	400,9	20,79	12089,0	1474,8	1,711	71,13	0,837	1105,4	10983,6	90,856
124,1	399,9	25,41	15089,0	1467,8	2,175	88,84	0,852	1435,8	13653,2	90,484
148,1	400,6	30,40	18229,0	1459,9	2,707	106,58	0,864	1937,2	16291,8	89,373
172,4	399,9	35,95	21469,0	1451,0	3,303	124,82	0,862	2505,3	18963,7	88,331
196,0	401,1	41,68	24773,0	1440,0	4,017	142,98	0,856	3216,8	21556,2	87,015

Tab. 3.12 Zatěžovací charakteristiky s naměřenými a vypočtenými hodnotami, konstantní napětí část 2.

P2 %	U _u (V)	U _v (V)	U _w (V)	I _u (A)	I _v (A)	I _w (A)
25,3	401,6	400,6	401,8	9,55	9,72	9,60
50,6	400,4	399,2	400,8	12,58	12,74	12,51
75,6	400,7	399,6	401,1	16,52	16,55	16,39
99,9	401,4	400,0	401,5	20,93	20,79	20,64
124,1	400,1	399,1	400,5	25,54	25,32	25,37
148,1	400,7	399,7	401,3	30,60	30,27	30,34
172,4	400,0	399,0	400,5	36,20	35,75	35,91
196,0	401,3	400,1	401,8	42,00	41,40	41,64

Tab. 3.13 Zatěžovací charakteristiky s naměřenými a vypočtenými hodnotami dle IEC, konstantní napětí

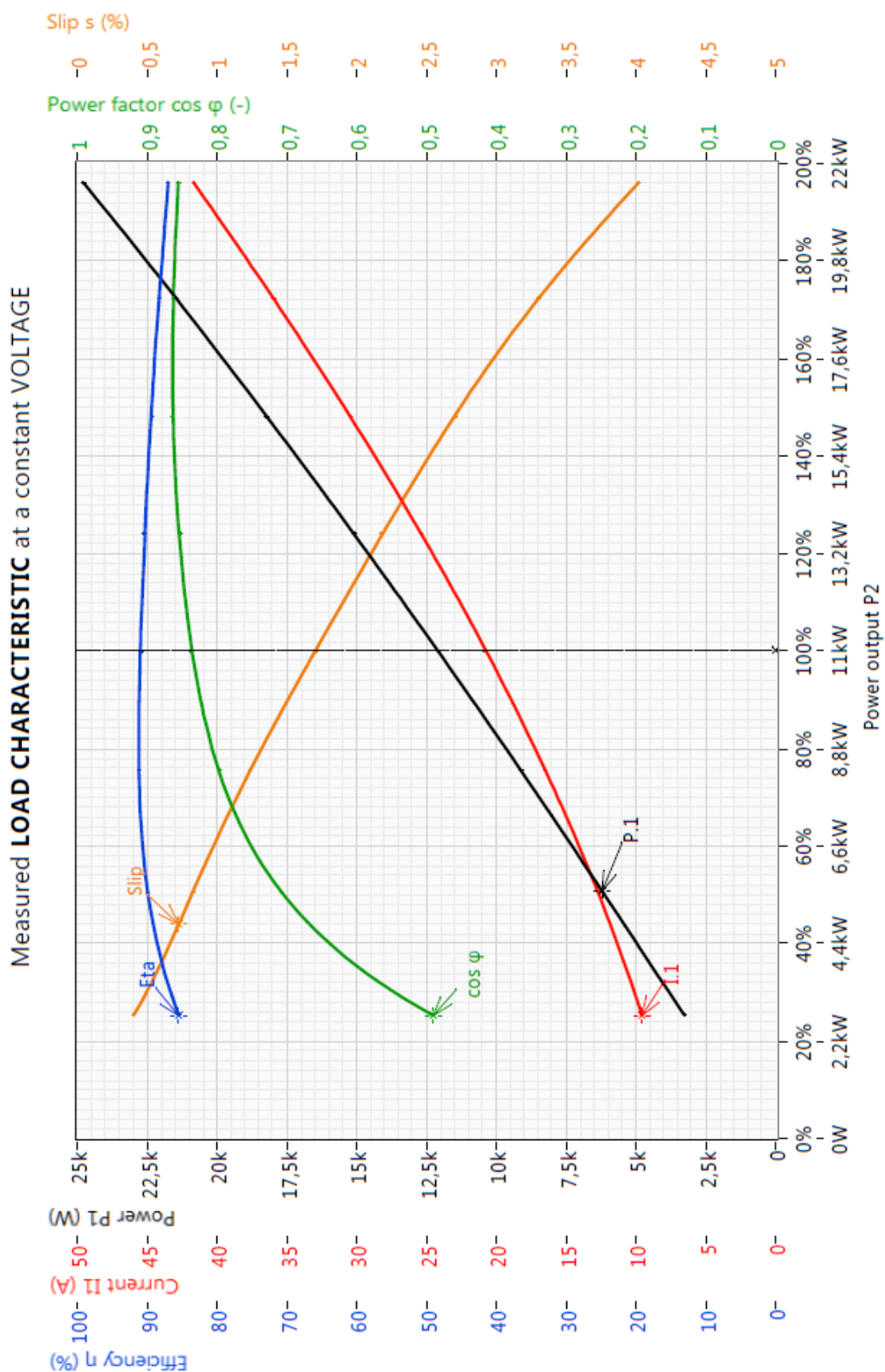
P2 (%)	U1 (V)	I1 (A)	P1 (W)	n (1/min)	s (%)	ΔP _{fe} (W)	ΔP _s (W)	ΔP _r (W)	ΔP _l (W)	ΔP _t (W)	P2 (W)	η (%)
25,9	401,3	9,62	3260,0	1493,7	0,407	232,7	84,8	12,0	7,1	410,2	2849,8	87,417
51,5	400,1	12,61	6186,0	1487,4	0,838	227,5	145,7	48,7	28,6	524,0	5662,0	91,529
76,3	400,5	16,48	9109,0	1481,8	1,246	224,7	248,9	107,6	64,5	719,3	8389,7	92,104
100,8	400,9	20,79	12089,0	1474,5	1,732	222,0	395,7	198,7	113,6	1003,6	11085,4	91,698
124,7	399,9	25,41	15089,0	1467,5	2,201	217,2	591,5	314,4	177,3	1373,9	13715,1	90,894
148,8	400,6	30,40	18229,0	1459,4	2,739	214,8	846,6	470,3	255,2	1860,4	16368,6	89,794

Tab. 3.14 Zatěžovací charakteristiky s naměřenými a vypočtenými hodnotami, konstantní moment část 1.

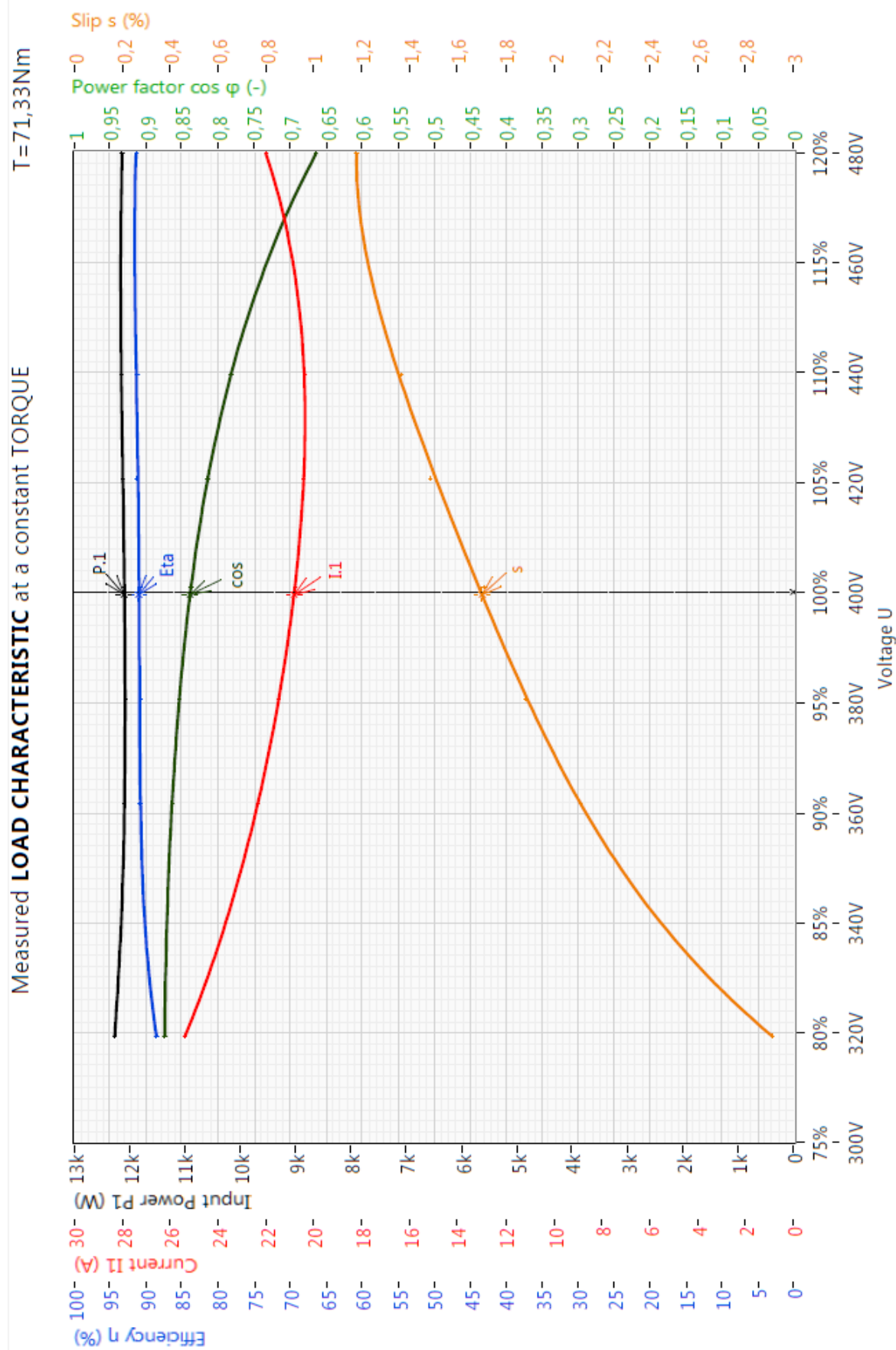
U1 (%)	U1 (V)	I1 (A)	P1 (W)	s (%)	n (1/min)	cosφ (-)	ΔP _{fe} (W)	P _s (W)	P _r (W)	P _l (W)	P _t (W)	P (W)	η (%)
79,8	319,3	25,37	12265,0	2,913	1457,0	0,874	140,5	590,6	340,5	263,5	1408,7	10856,3	88,51
90,4	361,7	22,34	12092,0	2,113	1469,0	0,864	182,6	458,0	245,3	146,7	1106,1	10985,9	90,85
95,2	380,6	21,45	12068,0	1,881	1472,4	0,853	206,2	422,1	218,1	193,3	1113,3	10954,7	90,77
100,2	400,9	20,79	12089,0	1,711	1474,8	0,837	236,0	396,3	198,7	200,8	1105,4	10983,6	90,86
105,2	420,8	20,44	12126,0	1,485	1478,4	0,814	270,7	383,1	172,7	149,1	1049,2	11076,8	91,35
109,9	439,6	20,39	12139,0	1,365	1478,6	0,782	309,6	381,6	158,4	144,5	1067,7	11071,3	91,20
120,0	479,9	22,00	12132,0	1,178	1482,0	0,664	418,1	444,0	134,6	-24,9	1045,5	11086,5	91,38

Tab. 3.15 Zatěžovací charakteristiky s naměřenými a vypočtenými hodnotami, konstantní moment část 2.

U1 (%)	U _u (V)	U _v (V)	U _w (V)	I _u (A)	I _v (A)	I _w (A)
79,8	319,5	318,6	320,0	25,52	25,28	25,33
90,4	362,0	361,0	362,1	22,51	22,27	22,26
95,2	380,9	379,8	381,3	21,59	21,41	21,35
100,2	401,4	400,0	401,5	20,93	20,79	20,64
105,2	421,0	419,9	421,4	20,52	20,43	20,36
109,9	440,1	438,7	440,0	20,48	20,39	20,31
120,0	480,3	479,0	480,3	22,00	22,01	21,98



obr. 3.7 Zatěžovací charakteristika při konstantním napětí



obr. 3.8 Zatěžovací charakteristika při konstantním momentu

3.6 Rozběhové zkoušky

Určují podmínky a způsoby určení záběrného momentu, proudu a průběhy momentové charakteristiky. Záběrný moment a proud se určují z momentové charakteristiky nebo přímým měřením z měření nakrátko. Přímému měření se dává přednost, pokud jej měřicí zařízení a velikost stroje dovoluje provést. Momentová charakteristika a průběh proudu je stanoven buď rozběhovými zkouškami, nebo statickým zatěžováním. Přípustná je i kombinace obou způsobů, od synchronních otáček po moment zvratu zatěžováním a zbylá část dynamickou metodou. Jmenovité hodnoty záběrného momentu a proudu jsou určeny podle předepsaných spouštěcích podmínek.

- Teplota stroje je blízká teplotě pracovní, je předepsán způsob zapojení a jsou stanoveny podmínky spouštění
- Pro střídavé stroje při jmenovitém napětí a kmitočtu
- Pro asynchronní motory s přepínačem Y – D při spojení do Y
- U motorů s více hodnotami jmenovitých otáček při všech spouštěcích zapojeních
- Pro motory s přepínačem pólů, kde je rozběh proveden postupným přepínáním pólů os vyššího počtu k nižšímu při spojení s nejvyšším počtem pólů
- Pro stroje s jiným spouštěcím napětím, než jmenovitým při tomto napětí
- U komutátorových strojů se sběracím ústrojím ve spouštěcí poloze nebo v poloze odpovídající nejnižším otáčkám
- U kroužkových motor se zařazeným prvním, popřípadě dalším stanoveným stupněm odporového spouštěče
- U ss motorů při jmenovitém napětí, jmenovitém buzení a případně při zařazeném stupni spouštěče

Za záběrný moment je považován nejmenší naměřený ustálený moment. Musí být měřen při různých polohách rotoru proti statoru. Současně je měřen točivý moment, odebíraný proud a napájecí napětí. Nemá-li zkušebna dostatečně výkonný zdroj nebo hrozí-li poškození motoru při měření, tak je možné záběrný moment měřit při sníženém napětí. Normou je dáno alespoň 60% předepsaného zkušebního napětí. Záběrný proud I_Z je přepočten z naměřeného proudu nakrátko I_K . Naměřený vnitřní záběrný moment T_{IN1} se přepočte na záběrný moment T_1 pomocí rovnice 3.7, nebo 3.8. Pomocí přepočtu dle výrazu 3.8 dostaneme menší hodnotu T_1 . [8, s. 9-10], [11]

$$T_1 = T_{IN1N} = T_0 \quad (3.6.)$$

$$T_{IN1N} = T_{IN1} \cdot \frac{I_Z^2}{I_K^2} \quad (3.7.)$$

$$T_{IN1N} = T_{IN1} \cdot \frac{U_N^2}{U_K^2} \quad (3.8.)$$

kde	T_1	záběrný moment na hřídeli při jmenovitém napětí v N·m
	T_{IN1N}	vnitřní záběrný moment při jmenovitém napětí v N·m
	T_0	moment klidového tření stroje v N·m
	T_{IN1}	vnitřní záběrný moment při sníženém napětí U_K nebo sníženém proudu I_K v N·m
	I_Z	záběrný proud při jmenovitém napětí nebo určený extrapolací v A
	I_K	proud nakrátko při sníženém napětí v A
	U_N	jmenovité napětí ve V
	U_K	snížené napětí při zkoušce nakrátko ve V

Měření momentové charakteristiky probíhalo ve dvou krocích. V prvním byl pomocí postupného zatěžování změřen moment zvratu, byla změřena tzv. ořezaná momentová charakteristika. Měření probíhalo pro tři snížená napětí. Hodnoty napětí odpovídaly cirká 291, 260 a 230 V. Pro každé snížené napětí bylo změřeno sedm bodů. Přičemž každý bod byl měřen s jiným zatížením. Naměřené hodnoty jsou dále extrapolovány na jmenovité napětí (400 V). Tomuto napětí odpovídá moment zvratu (211,13 Nm). V tabulkách 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 a 3.20 jsou tyto naměřené hodnoty uvedeny.

Na druhý krok připadá měření celé momentové charakteristiky dynamickou metodou. Při měření se zaznamenává primární proud, příkon statoru, a otáčky v závislosti na čase. Aby došlo k rozběhu motoru až po utlumení přechodných jevů, je doporučeno motor roztočit před zapnutím v opačném směru [11]. Aby nedošlo k velkému zahřátí stroje při měření je provedeno v opačném smyslu, než je uvedeno v tabulkách 3.21, 3.22 a 3.23. To znamená, že motor je měřen od synchronních otáček až po záporné hodnoty. Při tvorbě grafického řešení se využívá tzv. dotyčnicové metody viz ČSN 350010.

Tab. 3.16 Ořezaná momentová charakteristika pro $U = 291$ V

U (%)	U1 (V)	Uu (V)	Uv (V)	Uw (V)	n (1/min)	T (Nm)	I1 (A)
72,36	289,45	289,70	288,63	290,02	1463,76	51,03	19,98
72,83	291,33	291,46	290,61	291,91	1425,36	83,88	35,48
72,71	290,84	291,04	289,99	291,51	1391,76	97,30	45,43
72,61	290,44	290,61	289,41	291,29	1344,48	103,87	55,80
72,81	291,25	291,49	290,15	292,10	1304,88	104,47	62,20
72,55	290,20	290,38	289,14	291,08	1257,36	100,86	67,57
72,84	291,35	291,70	290,13	292,22	1203,36	97,11	72,52

Tab. 3.17 Ořezaná momentová charakteristika pro $U = 260 \text{ V}$

U (%)	U1 (V)	Uu (V)	Uv (V)	Uw (V)	n (1/min)	T (Nm)	I1 (A)
65,10	260,39	260,59	259,71	260,87	1466,16	37,67	16,44
65,03	260,12	260,26	259,39	260,71	1422,24	66,66	31,91
65,17	260,68	260,79	259,96	261,30	1393,44	76,10	39,65
64,96	259,83	260,07	258,96	260,47	1342,56	81,11	49,55
65,09	260,37	260,64	259,41	261,07	1305,12	81,27	54,65
65,19	260,78	261,02	259,77	261,56	1257,12	78,93	59,66
65,17	260,66	260,94	259,69	261,36	1201,68	74,74	63,79

Tab. 3.18 Ořezaná momentová charakteristika $U = 230 \text{ V}$

U (%)	U1 (V)	Uu (V)	Uv (V)	Uw (V)	n (1/min)	T (Nm)	I1 (A)
57,53	230,14	230,30	229,59	230,53	1464,24	30,35	15,19
57,40	229,59	229,67	229,02	230,08	1427,04	49,27	26,57
57,79	231,17	231,35	230,49	231,67	1388,88	59,51	35,66
57,74	230,96	231,10	230,32	231,46	1337,76	62,77	44,09
57,43	229,71	229,89	228,95	230,28	1302,24	61,34	47,83
57,71	230,84	231,01	230,08	231,44	1257,60	59,80	51,92
57,42	229,68	229,88	228,82	230,33	1203,12	55,79	55,06

Tab. 3.19 Momenty pro $U = 291, 260, 230 \text{ V}$

U (%)	U1 (V)	n (1/min)	T (Nm)	I1 (A)
72,75	291,00	1331,28	104,60	75,67
65,00	260,00	1334,45	81,63	66,46
57,50	230,00	1337,62	62,34	57,55

Tab. 3.20 Extrapolace pro $U_n = 400 \text{ V}$

100	U1 (V)	n (1/min)	T (Nm)	I1 (A)
U (%)	400,00	1318,62	211,13	87,47

Tab. 3.21 Jednotlivé odhadované body momentové charakteristiky

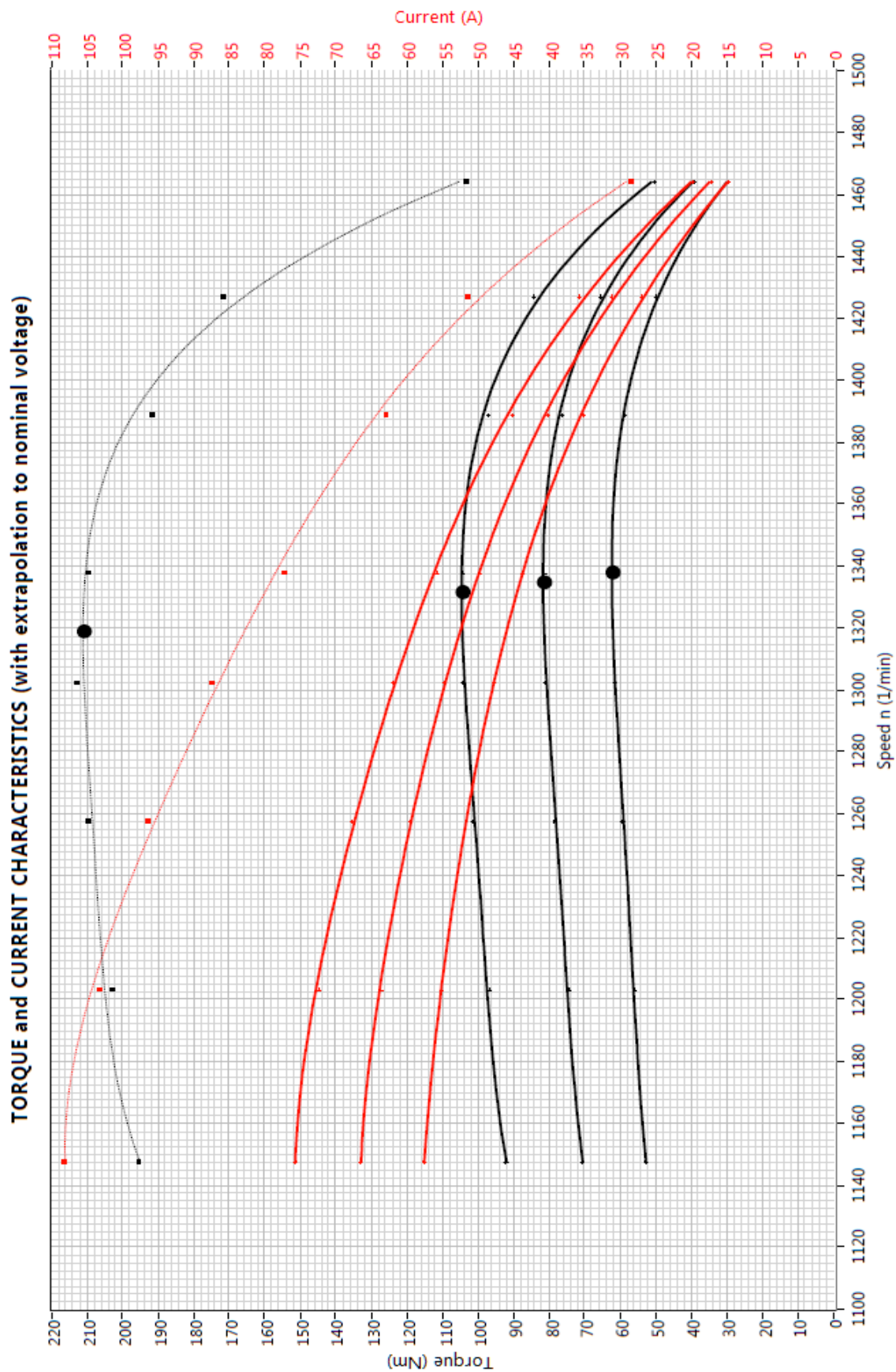
n (%)	U ₁ (V)	n (1/min)	T (Nm)	I ₁ (A)
-0,18	400,00	-2,65	221,78	147,71
5,24	400,00	77,35	157,80	145,84
9,99	400,00	147,35	153,98	144,92
14,74	400,00	217,35	147,78	143,85
20,16	400,00	297,35	145,70	142,51
24,90	400,00	367,35	145,85	141,28
30,33	400,00	447,35	146,30	139,70
35,07	400,00	517,35	145,47	138,28
39,82	400,00	587,35	149,37	136,74
45,24	400,00	667,35	153,12	134,83
49,99	400,00	737,35	154,81	133,02
54,74	400,00	807,35	159,68	130,92
60,16	400,00	887,35	166,73	128,13
64,90	400,00	957,35	173,95	125,23
70,33	400,00	1037,35	184,09	120,87
75,07	400,00	1107,35	195,50	116,11
79,82	400,00	1177,35	206,53	109,31
85,24	400,00	1257,35	217,40	98,34
89,99	400,00	1327,35	223,14	83,63
94,74	400,00	1397,35	189,42	57,94
100,16	400,00	1477,35	40,69	13,31

Tab. 3.22 Moment pro U = 239, 278, 318 V

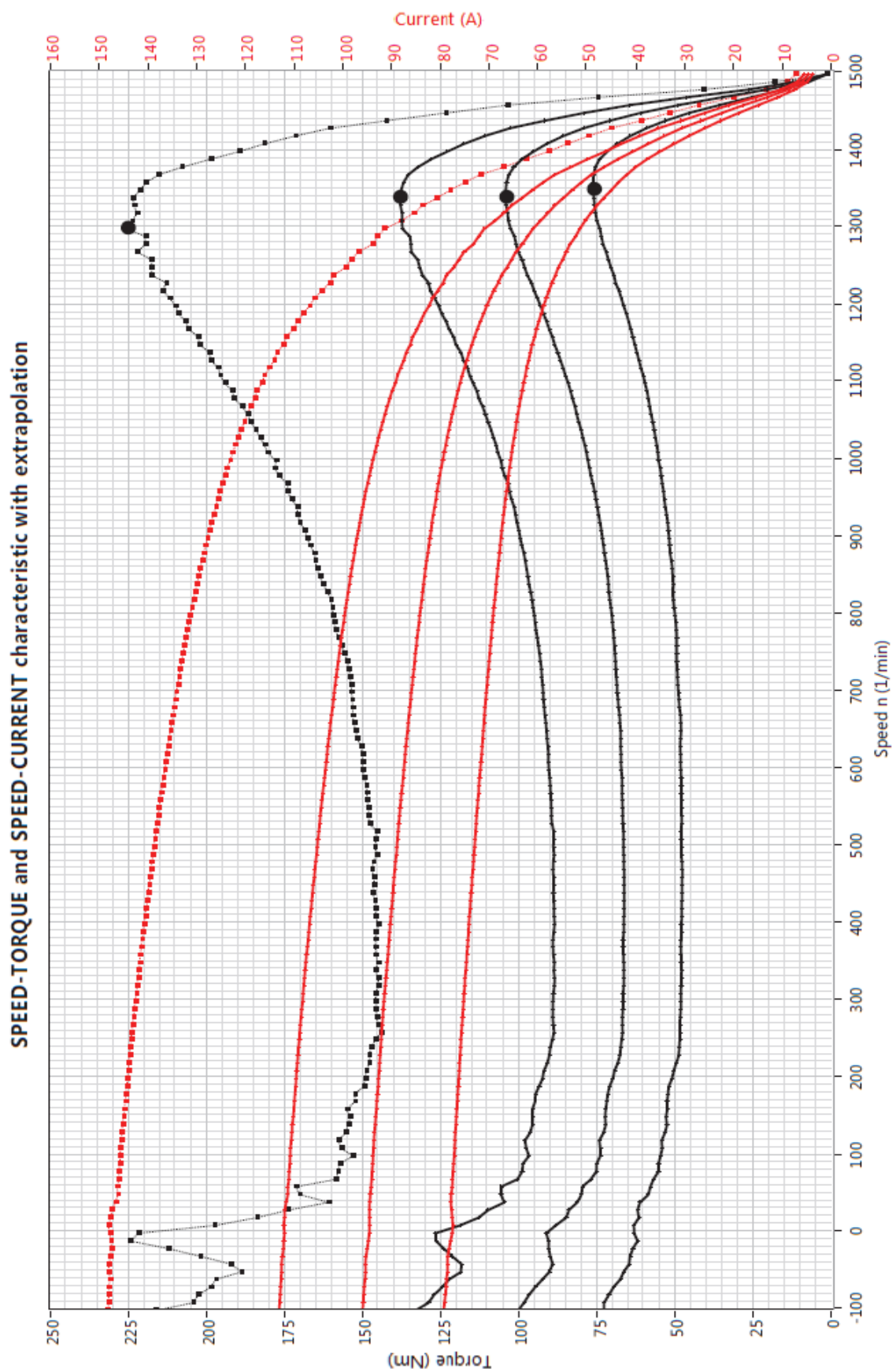
U ₁ (%)	U ₁ (V)	n (1/min)	T (Nm)	I ₁ (A)
59,75	239,00	1347,35	76,15	77,83
69,50	278,00	1337,35	104,23	94,60
79,50	318,00	1337,35	138,14	112,09

Tab. 3.23 Extrapolace momentu zvratu pro U_n = 400 V

U ₁ (%)	U ₁ (V)	n (1/min)	T _{max} (Nm)	I ₁ (A)
100,00	400,00	1297,35	225,29	91,48



obr. 3.9 Ořezaná momentová charakteristika

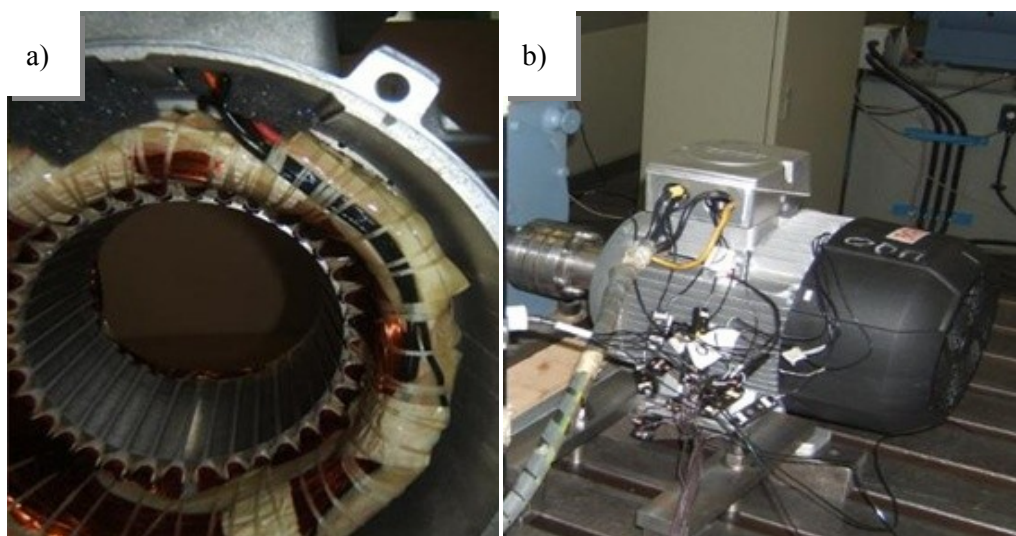


obr. 3.10 Momentová charakteristika

3.7 Oteplovací zkouška

Důvodem oteplovací zkoušky je ověření, zda oteplení jednotlivých částí nepřekročí dovolené hodnoty. Měření se provádí při jmenovité výkonnosti stroje tj. jmenovitém proudu, kmitočtu, otáčkách, pracovním skluzu a daném způsobu chlazení stroje. Oteplovací zkouškou je možno určit, o kolik se může zvýšit výkon, aniž by se překročily meze dovoleného oteplení. [9, s. 264]

Měření se provádí za pomoci termočlánků, jejichž pomocí se zjišťují teploty jednotlivých částí stroje. Měření teploty se provádí až do doby, kdy se teplota ustálí. Této teplotě odpovídá čas, při němž se za hodinu měření nezmění teplota o 2K.

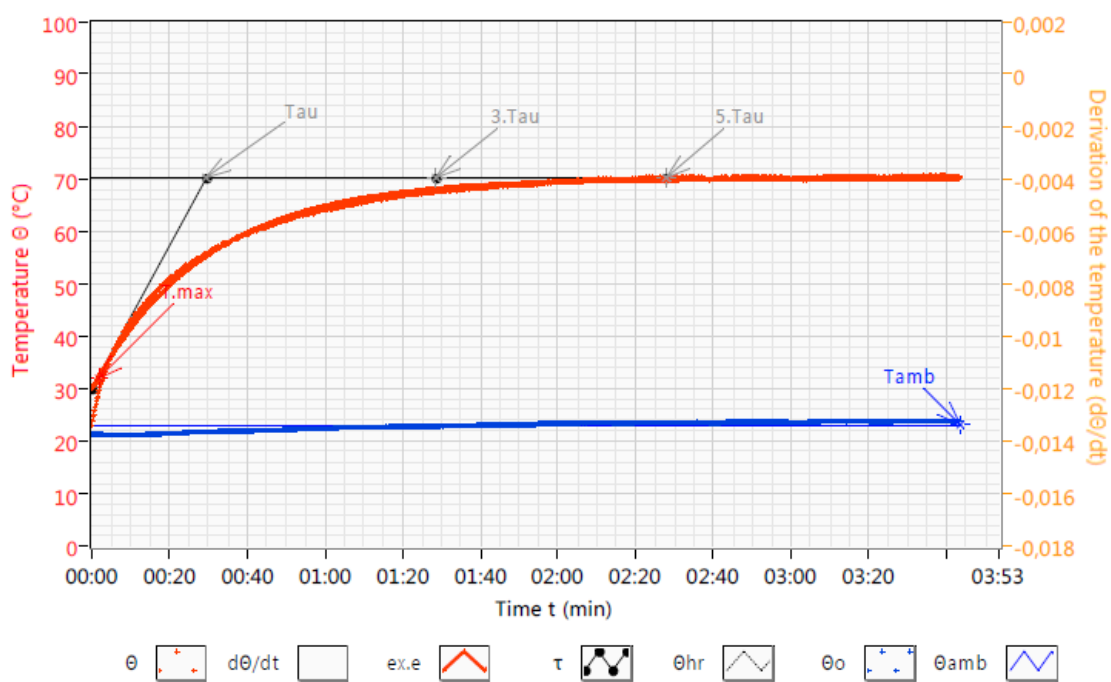


obr. 3.11 a) termočlánky umístěné ve statorovém vinutí, b) vyvedení termočlánků z motoru

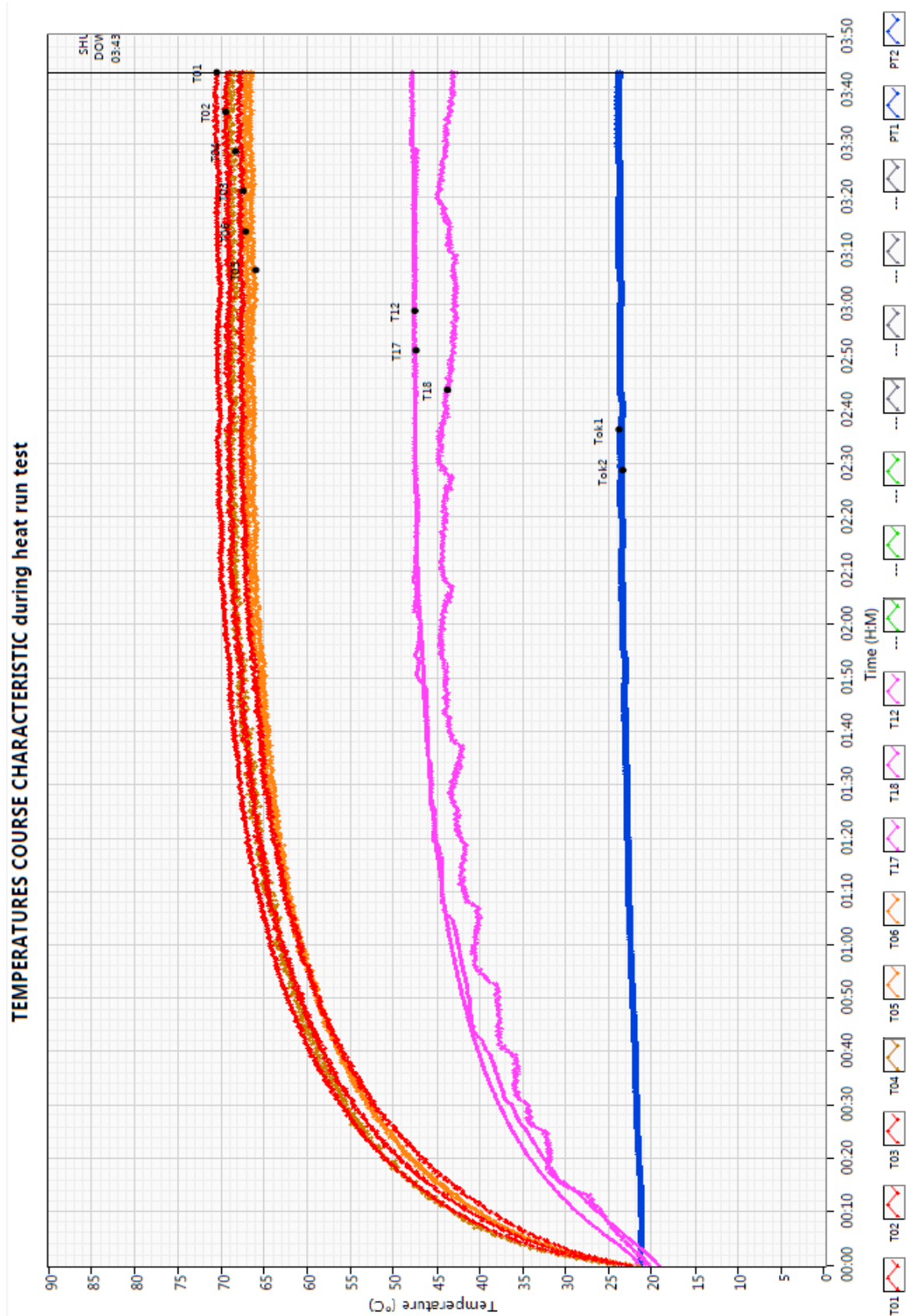
Oteplovací zkouška byla provedena při jmenovitých hodnotách stroje. V tabulce jsou uvedena místa, na kterých byly umístěny termočlánky. Jedná se o šest termočlánků, které jsou pro jednotlivé fáze umístěny ve vinutí statoru. A to tak, že polovina je umístěna na straně pohonu (DS) a druhá na straně ventilátoru (NDS). Další dva termočlánky snímají teplotu ložisek. Poslední termočlánek osazený na motoru snímá teplotu svorkovnice. Další dva termočlánky zaznamenávají okolní teplotu. Doba měření byla 3 hodiny a 43 minut. Interval záznamu hodnot byl po deseti minutách. V tabulce jsou uvedeny teploty před a po vypnutí motoru. Interpolací byla stanovena časová konstanta $\tau = 29,53$ min. Přičemž k ustálení teploty došlo za 5τ , jak je možno vidět z obr. 3.12.

Tab. 3.24 Změřené hodnoty v ustáleném stavu

Místo měření	Ustálená teplota Před vypnutím (°C)	Nárůst teploty (K)	Maximální Teplota po vypnutí (°C)
TC01 = T01 - Čelo vinutí DS (U)	70,47	46,67	70,48
TC02 = T02 - Čelo vinutí DS (V)	69,26	45,46	69,3
TC03 = T03 - Čelo vinutí DS (W)	67,84	44,03	67,83
TC04 = T04 - Čelo vinutí NDS (U)	68,84	45,04	68,97
TC05 = T05 - Čelo vinutí NDS (V)	66,5	42,7	66,44
TC06 = T06 - Čelo vinutí NDS (W)	67,1	43,3	67,04
TC07 = T17 - Vnější kroužek ložiska DS	47,8	24	47,85
TC08 = T18 - Vnější kroužek ložiska NDS	43,09	19,29	43,2
TC09 = T12 – Šroub svorkovnice	47,89	24,09	47,95
TC10 = ----	---	---	---
TC11 = ----	---	---	---
TC12 = ----	---	---	---
TC13 = ----	---	---	---
TC14 = ----	---	---	---
TC15 = ----	---	---	---
TC16 = ----	---	---	---
RTD1 = Tamb1 - Teplota okolí 1	23,98	---	---
RTD2 = Tamb2 - Teplota okolí 2	23,62	---	---



obr. 3.12 Grafické znázornění růstu teploty pomocí časových konstant



obr. 3.13 Grafický záznam oteplovací zkoušky

3.8 Měření hluku

Hluk se měří a snažíme se jej odstranit, abychom odstranili jeho nepříznivý vliv na lidský organismus a aby se zabránilo nežádoucímu opotřebení chvějících se a hlučících částí. [9, s. 277]

Motor musí být umístěn v polobezodrazové hlukové komoře, tak aby bylo dosaženo dostatečného prostoru, který jej dokonale obklopí. Při montáži v hlukové komoře se musíme řídit všeobecně platnými předpisy, které jsou určeny pro montáž zdroje hluku.

Jsou provedeny dvě měření hladiny akustického tlaku a to pro nezatížený a zatížený motor. První měření na nezatíženém motoru (naprázdno), je provedeno na pružné podložce (molitan). Druhé měření na zatíženém motoru, který je k podložce pevně připojen. Před zahájením měření je nutné stanovit všechny zkušební podmínky (teplota, tlak, vlhkost a rosný bod). Mezi podmínky taky patří uvedení stroje do požadovaného stavu ještě před zahájením samotného měření. Měření je provedeno v rozsahu 100 – 10000 Hz, přičemž každá frekvence je snímána po dobu 30s. Snímání je zajištěno deseti mikrofony, které jsou umístěny na polokouli ve středu místnosti nad zdrojem hluku jako je vidět na obr. 3.14. Tyto mikrofony musí být před každým měřením kalibrovány za pomoci kalibrátoru. Během měření je také nutné dodržet maximální rozmezí teplot (15 – 30°C). Kdyby tomu tak nebylo mohlo by dojít ke zkreslení měřených hodnot. [8, s. 53-54], [11]



obr. 3.14 Umístění měřeného motoru a měřících zařízení při určování hladin akustického výkonu

Měřenou veličinou je hladina akustického tlaku. Ta se musí následně převést na akustický výkon. Ten je spjat s postupující akustickou vlnou, která přenáší určité množství energie, které projde za jednotkou času určitou plochou. [10]

Akustický výkon

$$W = p \cdot v \cdot S \quad (3.9.)$$

kde p hodnota akustického tlaku v Pa

v akustická rychlost v $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

S měřená plocha kolmá na zvukový paprsek v m^2

Hladina akustického výkonu

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (3.10.)$$

$$W_0 = 10^{-12} W \quad (3.11.)$$

kde W referenční akustický výkon ve W

W_0 sledovaný akustický výkon ve W

Měření probíhalo pomocí deseti mikrofónů B&K 4942, které byly kalibrovány kalibrátorem B&K 4231. Výsledky byly zaznamenávány analyzátozem B&K PULSE 3560C. Motor byl měřen bez zátěže a se zátěží. Provozní podmínky motoru jsou uvedeny v tabulce 3.25. Měřený motor vyhověl, v obou případech, maximálním přípustným hodnotám akustického tlaku i výkonu. Výsledky jsou uvedeny v následujících tabulkách a grafech.

Tab. 3.25 Provozní podmínky při měření hluku

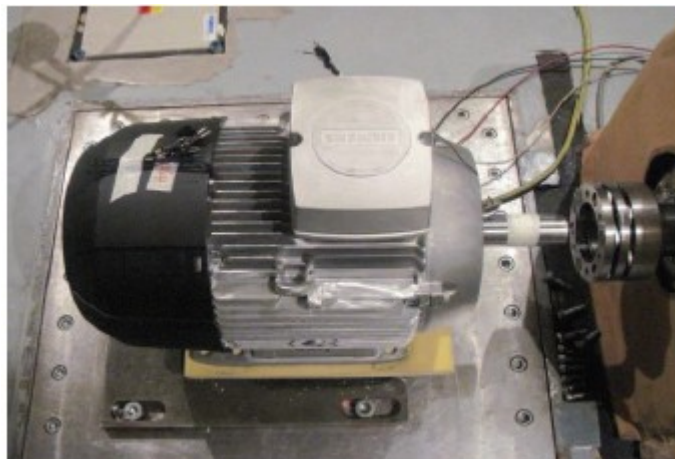
teplota (°C)		Tlak (kPa)		Vlhkost (%)		Rosný bod (°C)	
23,00		99,70		24,90		1,80	
MĚŘENÍ BEZ ZÁTĚŽE							
U (V)	I (A)	P (W)	P1 (W)	n (ot/min)	T (Nm)	cosφ (-)	f (Hz)
400,0	8,49	0,0	346,4	0,0	0,00	0,059	50,00
MEŘENÍ SE ZÁTĚŽÍ							
U (V)	I (A)	P (W)	P1 (W)	n (ot/min)	T (Nm)	cosφ (-)	f (Hz)
399,9	20,92	10999,8	11978,0	1477,6	71,09	0,827	50,00

Tab. 3.26 Výsledky měření hluku

MĚŘENÍ BEZ ZÁTĚŽE			MĚŘENÍ SE ZÁTĚŽÍ		
Hladina akustického tlaku <i>Sound pressure level</i>		Hladina ak. výkonu <i>Sound power level</i>	Hladina ak. tlaku <i>Sound pressure level</i>	Hladina ak. výkonu <i>Sound power level</i>	
Freq. (Hz)	$L_{pf}(A)$ (dB)	$L_W(A)$ (dB)	$L_{pf}(A)$ (dB)	$L_W(A)$ (dB)	
100	32,02	39,09	36,13	43,20	
125	34,14	41,21	36,38	43,45	
160	47,80	54,87	48,59	55,65	
200	45,14	52,21	43,23	50,29	
250	45,36	52,43	46,13	53,20	
315	47,60	54,67	52,91	60,01	
400	51,77	58,83	52,92	59,99	
500	54,08	61,14	56,37	63,43	
630	51,61	58,68	63,25	70,32	
800	55,99	53,06	57,87	64,93	
1000	54,50	61,56	57,58	64,64	
1250	57,11	64,18	59,98	67,04	
1600	53,40	60,47	54,71	61,78	
2000	53,19	60,26	53,95	61,02	
2500	51,02	58,08	51,08	58,15	
3150	48,47	55,54	54,95	62,02	
4000	16,64	56,71	54,77	61,84	
5000	43,21	50,27	43,85	50,92	
6300	39,23	46,30	40,27	47,33	
8000	34,18	41,25	35,23	42,29	
10000	30,00	37,07	32,18	39,25	

Tab. 3.27 Celkové výsledky měření hluku bez zátěže

MĚŘENÍ BEZ ZÁTĚŽE		
Celková hladina akustického výkonu <i>Total sound power level</i>	Celková hladina akustického tlaku <i>Total sound pressure level</i>	Celková hladina ak. Tlaku ve vzdálenosti 1m <i>Total sound pressure level at 1m</i>
$L_{W,Celk}(A)$ [dB]	$L_{pf,Celk}(A)$ [dB]	$L_{p,Celk}(A)$ [dB]
71,35	64,28 Dist. = 0,9 m Plocha dle ISO 3745	58,05 Dle ISO 3744



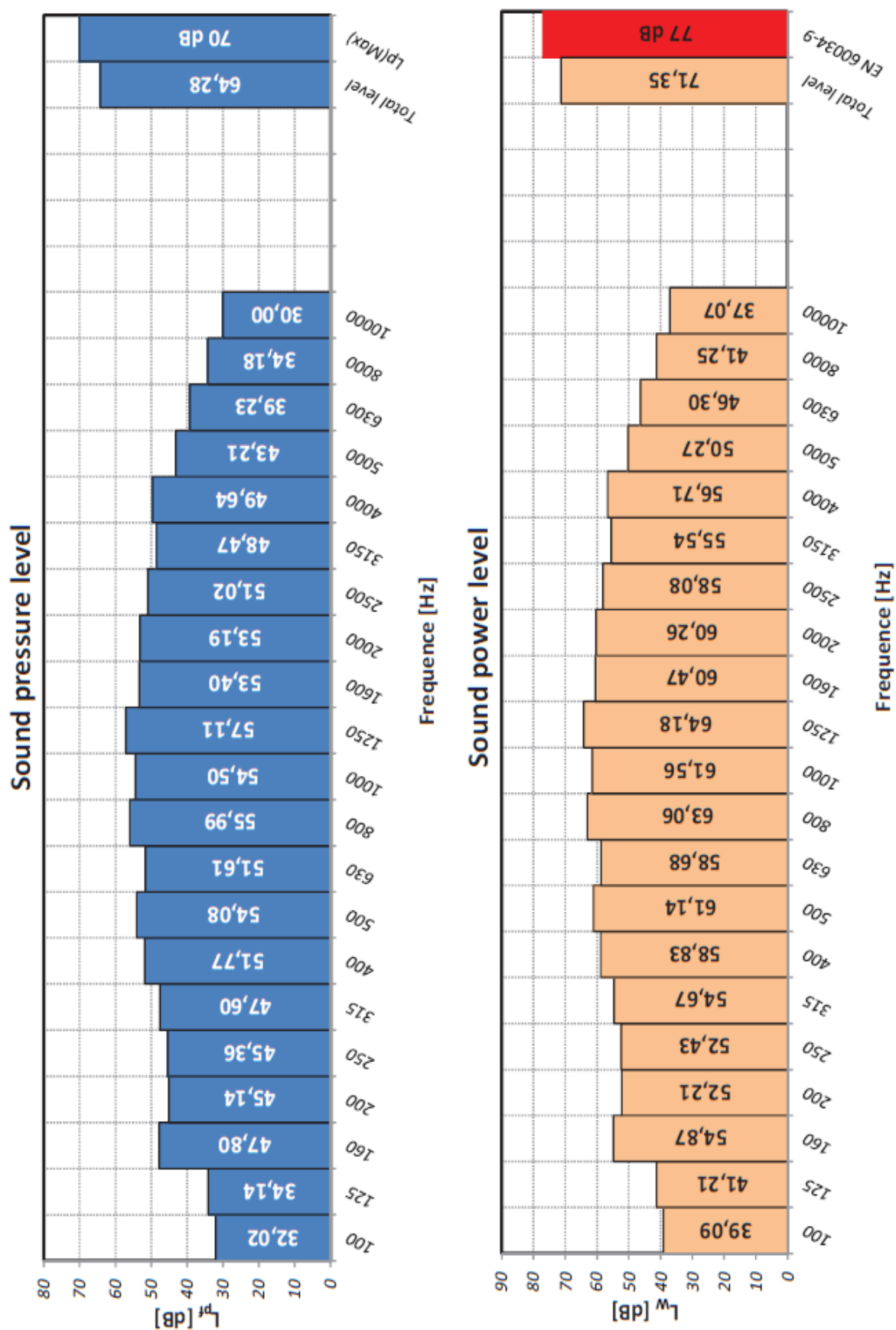
obr. 3.15 Měření hluku bez zátěže, motor umístěn na pružné podložce

Tab. 3.28 Celkové výsledky měření hluku se zátěží

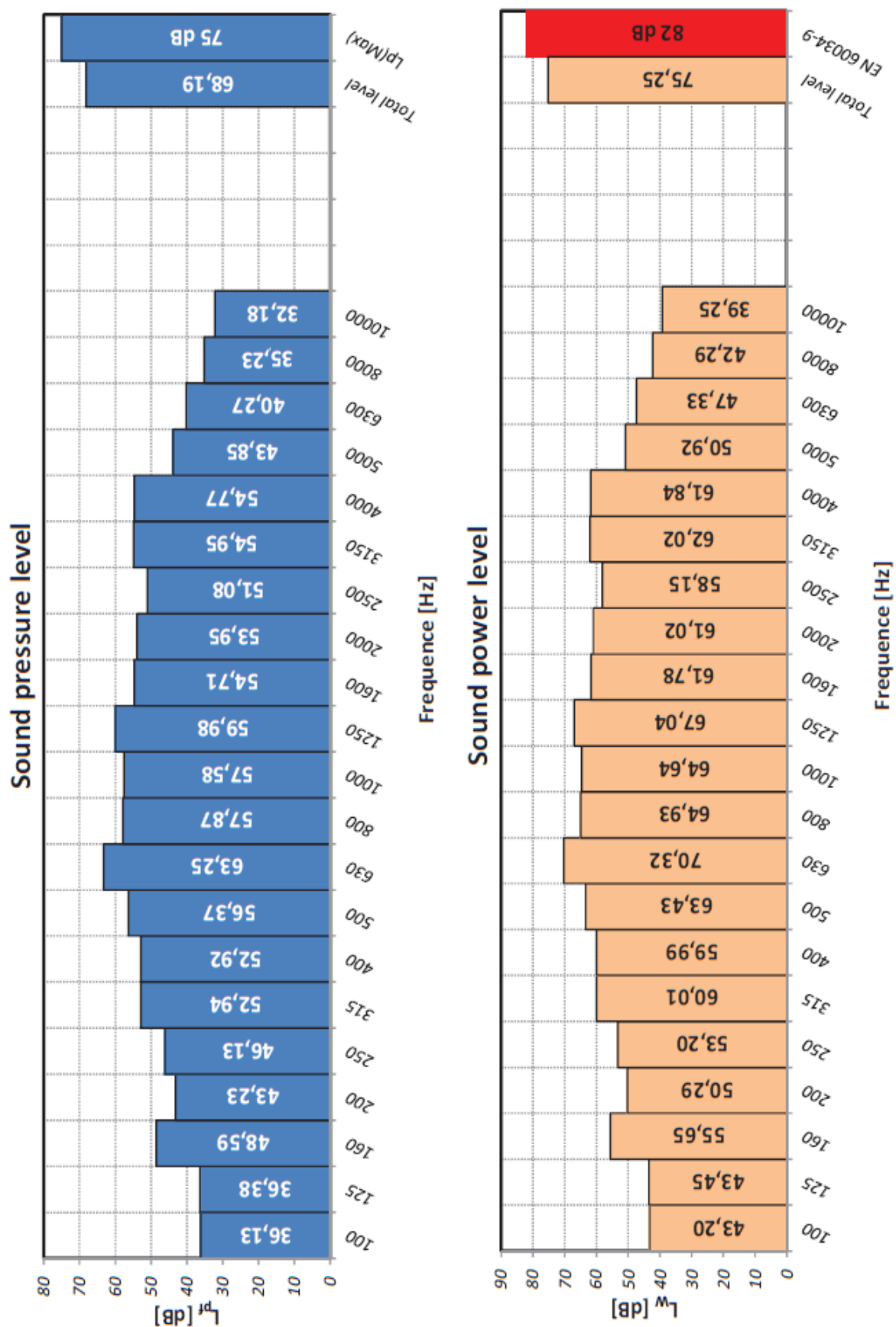
MĚŘENÍ SE ZÁTĚŽÍ		
Celková hladina akustického výkonu <i>Total sound power level</i>	Celková hladina akustického tlaku <i>Total sound pressure level</i>	Celková hladina ak. Tlaku ve vzdálenosti 1m <i>Total sound pressure level at 1m</i>
$L_{W,Celk}(A)$ [dB]	$L_{pf,Celk}(A)$ [dB]	$L_{p,Celk}(A)$ [dB]
75,25	68,19 Dist. = 0,9 m Plocha dle ISO 3745	61,95 Dle ISO 3744



obr. 3.16 Měření hluku se zátěží, motor umístěn na pevné podložce



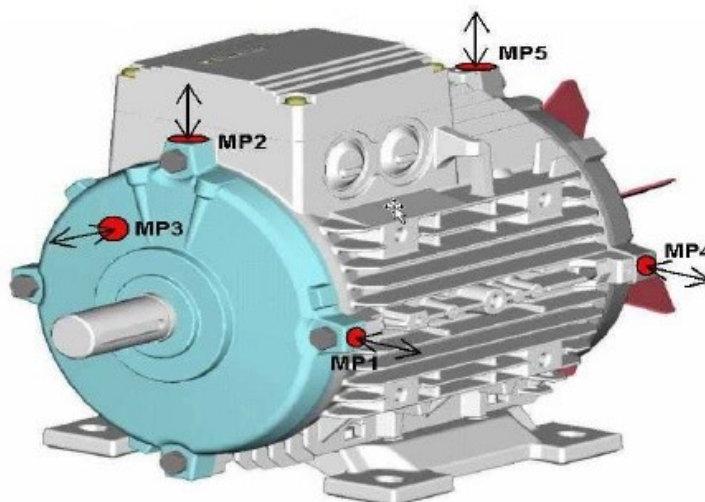
obr. 3.17 Grafické vyhodnocení měření hluku bez zátěže



obr. 3.18 Grafické vyhodnocení měření hluku se zátěží

3.9 Měření vibrací

Měření vibrací je důležité provádět za předem stanovených podmínek. To nám následně dovolí opakovatelnost samotného měření při ověřování případných nejasností. Měření vibrací bylo provedeno dle normy ČSN EN 60034 – 14 a požadavků dle normy ISO 2954. Zkouška se provádí na nezatíženém motoru, a to z důvodu omezení vibrací z ostatních zařízení, která by měla na vlastní měření neblahý vliv. Motor je měřen pro dvě varianty uložení. Pro první měření je zvoleno pružného uložení, motor je umístěn na podložce ze silomeru. V druhém případě je motor měřen při pevném uložení. Drážka pro pero umístěna na hřídeli byla v průběhu měření vyplněna půlperem. Tato úprava se volí z důvodu vyváženosti hřídele, jinak by docházelo ke vzniku vibrací, které by ovlivňovali samotné měření.



obr. 3.19 Vyznačená místa k měření vibrací [5]

Norma určuje, měřit vibrace na 6 různých místech elektromotoru jako je na obr. 3.19. Poslední bod není vyznačen, jelikož se nachází na místě ventilátoru a ten by musel být demontován. Protože ventilátor je součástí motoru došlo by při jeho demontáži ke zkreslení měření, a proto je měření provedeno pouze v pěti bodech. Hmotnost snímače musí být menší než $\frac{1}{50}$ celkové hmotnosti měřeného elektromotoru. [6, s. 46 – 52], [12]

Vibrace byly měřeny pomocí měřiče kmitání Card_NI 9234 + ACC.meter A102-1A, 100 mV/g. Měřenými hodnotami jsou rychlost vibrací v $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, zrychlení v $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ a výchylka v μm . Velikost vibrací je možno vyjádřit jako efektivní hodnotu širokopásmových vibrací ve frekvenčním pásmu 10 – 1000Hz. Měřený motor vyhověl stupni vibrací A podle ČSN EN 60034-14.

Tab. 3.29 Měření vibrací, pružné uložení

Uložení	Rychlost	Zrychlení	Výchylka	Měřené místo
	v_{eff} (mm/s)	a_{eff} (m/s ²)	s_{eff} (μm)	
Pružné	0,70	1,66	4,50	1
	0,83	0,57	6,50	2
	0,65	0,80	3,60	3
	0,43	1,45	2,30	4
	0,34	0,80	1,90	5
Standard	2,2	3,5	35	

Tab. 3.30 Měření vibrací, pevné uložení

Uložení	Rychlost	Zrychlení	Výchylka	Měřené místo
	v_{eff} (mm/s)	a_{eff} (m/s ²)	s_{eff} (μm)	
Pevné	0,29	1,58	0,60	1
	0,38	0,96	0,60	2
	0,31	1,08	0,70	3
	0,31	0,93	0,60	4
	0,26	0,66	0,50	5
Standard	1,8	2,8	29	



obr. 3.20 Osciloskopický záznam vibrací v programu eProTeam

3.10 Stanovení účinnosti elektromotoru

Účinnost elektromotoru je vyjádřena v procentech. K jejímu určení je zapotřebí provedení výše zmíněných dílčích zkoušek, které je nutné provést v určitém sledu, aby nebylo nutné znovudosažení požadovaných teplot elektromotoru. Ke stanovení účinnosti dle ČSN EN 60034 – 2 – 1 slouží několik metod, přímých a nepřímých. První z nich obnáší měření vstupního elektrického a výstupního mechanického výkonu. Druhá metoda je založena na měření vstupu a výstupu u dvou totožných elektromotorů. Ty jsou vzájemně mechanicky spojeny při rekuperačním zapojení. Této metody se využívá k vyloučení měření mechanického výkonu. Poslední metodou je měření skutečných ztrát elektromotoru při určitých podmínkách. Této metody se využívá k výpočtu jak celkových ztrát, tak jednotlivých složek ztrát. [13], [6, s. 60-63]

Výpočet účinnosti metodou přímého stanovení účinnosti je provedeno dle IEC 60034-2-1:2007, ČSN EN 60034-2-1:2008. Dále je účinnost stanovena metodou srovnání vstupních a výstupních hodnot se segregovanými ztrátami dle IEEE112:2004 a CSA C390:2010. V následujících tabulkách jsou shrnuty účinnosti při 25, 50, 75, 100, 125 a 150 procentech zatížení motoru. Minimální účinnost IE3 pro čtyřpólový asynchronní motor při 100% zatížení je 91,4%. Motor tedy splňuje podmínky pro účinnost skupinu IE3 a Nema Premium.

Tab. 3.31 Shrnutí dle IEC 60034-2-1:2007, ČSN EN 60034-2-1:2008

Zatížení (%)	25	50	75	100	125	150
Výkon P.2 (W)	3,69	7,38	11,06	14,75	18,44	22,13
Výkon P.2 (hp)	2750	5500	8250	11000	13750	16500
Účinník $\cos\varphi$ (-)	0,475	0,7	0,794	0,837	0,857	0,864
Účinnost η (%)	87,15	91,43	92,12	91,73	90,9	89,76
Otáčky n (rpm)	1494,1	1487,8	1482,3	1475	1467,8	1459,4
Síťový proud I (A)	9,55	12,4	16,27	20,64	25,45	30,64

Tab. 3.32 Shrnutí dle IEEE112:2004

Zatížení (%)	25	50	75	100	125	150
Výkon P.2 (W)	3,69	7,38	11,06	14,75	18,44	22,13
Výkon P.2 (hp)	2750	5500	8250	11000	13750	16500
Účinník $\cos\varphi$ (-)	0,475	0,7	0,794	0,837	0,857	0,864
Účinnost η (%)	87,13	91,36	92,07	91,7	90,88	89,77
Otáčky n (rpm)	1494,1	1487,8	1482,3	1475	1467,7	1459,4
Síťový proud I (A)	9,55	12,41	16,28	20,65	25,48	30,64

Tab. 3.33 Shrnutí dle CSA C390:2010

Zatížení (%)	25	50	75	100	125	150
Výkon P.2 (W)	3,69	7,38	11,06	14,75	18,44	22,13
Výkon P.2 (hp)	2750	5500	8250	11000	13750	16500
Účinník $\cos\varphi$ (-)	0,475	0,7	0,794	0,837	0,857	0,864
Účinnost η (%)	87,15	91,43	92,12	91,73	90,9	89,76
Otáčky n (rpm)	1494,1	1487,8	1482,3	1475	1467,8	1459,4
Síťový proud I (A)	9,55	12,4	16,27	20,64	25,47	30,64

3.11 Přehled použitých měřících přístrojů

Tab. 3.34 Měřicí přístroje, část 1.

Číslo měřícího pracoviště	Sériové číslo měřícího zařízení	Měří	Výrobce	Model
2	22003056	Napětí	YOKOGAWA	YOKOGAWA WT230 S. No. 12C619103F
2	22003056	Proud		
2	22003056	Výkon		
2	22003056	Odpor	VÚES Brno	Sources of constant current & measurement unit TOP
2	22003056	Teplotu	VÚES Brno	PT100 - Type J
2	22003056	Moment	Interface	Force transducer model SM
2	22003056	Otáčky	VÚES Brno	ADAM 4080 & Sensor ROD 426 500 03R

Tab. 3.35 Měřicí přístroje, část 2.

Měří	Výrobce	Model	Sériové číslo	Poznámka_Název_Datum
Teplotu	ELCOM	WDL - 01	EVIP 110056-001	
Teplotu	ELCOM	WDL - 02	EVIP 110056-002	
Teplotu	AHLBORN	THERM 2220-12	H02010021K	Needle probes: T123-3 J2, A481, B481
Teplotu	Fluke	Ti 32	Ti32-13080425	
Vibrace	National Instr.	9234	150D014	With accelerometer Adash A102-1A (s. No. 1265)
Vysoké napětí	SPS Electronic	HA 3600A	11081764	
Izolační odpor	Chauvin Arnoux	C.A 6545	161751LKH	

4 Vyhodnocení a porovnání naměřených hodnot

V následující části je provedeno srovnání parametrů elektromotoru s měděným rotorem a hybridním rotorem.

Naměřené hodnoty elektromotorů s upravenými rotory jsou porovnávány s hodnotami katalogového hybridního elektromotoru.

4.1 Srovnání elektromotoru s měděným a hybridním rotorem

Aby bylo zřetelné, jak se liší parametry hybridního elektromotoru od elektromotoru s měděným rotorem je uvedena následující tabulka. Ta obsahuje porovnání měřených hodnot obou typů elektromotorů. Hodnocení je provedeno při různých variantách napájení.

- ① 400V/50Hz/11kW
- ② 460V/60Hz/11kW
- ③ 460V/60Hz/12,6kW

Tab. 4.1 Porovnání měřených hodnot elektromotoru s měděným a hybridním rotorem

Provedení rotoru		①		②		③	
		HYB	Cu	HYB	Cu	HYB	Cu
f	Hz	50,01	50,00	60,10	60,00	60,00	60,00
U	V	400,00	400,00	460,25	459,60	460,25	460,00
P ₁	W	11959,0	11937,5	11927,0	11852,3	13631,0	13637,0
P ₂	W	10999,9	11000,2	10993,0	11000,9	12598,6	12599,5
I	A	20,62	20,65	18,06	18,03	20,23	20,27
n	min ⁻¹	1476,2	1476,8	1779,6	1780,2	1775,0	1775,9
η	%	92,13	92,10	92,75	92,80	92,59	92,40
cosφ	-	0,837	0,834	0,829	0,826	0,845	0,844
s	%	1,598	1,547	1,142	1,100	1,392	1,339
I _z	A	152,00	157,28	149,80	159,49	150,40	159,56
M _z	Nm	168,00	181,17	146,10	178,22	164,60	178,38
M _{zv}	Nm	214,56	239,99	205,24	223,33	201,37	223,53
Δθ 30s	K	39,3	40,8	32,2	32,1	38,4	39,7
Δθ 0s	K	41,6	42,8	34,0	33,6	40,9	41,7
ΔP _{FE}	W	211,5	215,6	246,6	254,0	261,6	242,0
ΔP _s	W	383,0	395,5	285,7	290,8	367,8	379,5
ΔP _r	W	182,0	177,0	129,8	122,2	181,3	176,2
ΔP _{fw}	W	66,4	56,9	108,6	84,6	95,4	84,6
ΔP _{LL}	W	97,7	117,5	94,3	92,3	103,9	143,2
ΔP _T	W	940,6	962,5	865,0	843,9	1010,0	1025,5

Jak je vidět z tabulky, tak hodnoty účinnosti zůstávají takřka neměnné. Taktéž účinník a skluz. Tyto hodnoty splnili tolerance dle ČSN EN 60034 – 1. Patrné rozdíly u těchto dvou provedení jsou dle očekávání ve velikosti, záběrného proudu a momentu.

Pro napájení ① byla velikost záběrného proudu hybridního elektromotoru 152 A, což je 7,4 násobek jmenovitého proudu. Motor s měděným rotorem dosáhl hodnoty proudu 157,28 A, to odpovídá 7,6 násobku jmenovitého proudu. Hybridní motor tak splnil toleranci $+20\% I_Z$, dle ČSN EN 60034 – 1. Záběrný moment u hybridního elektromotoru dosáhl 168 Nm, oproti tomu s měděným rotorem byla velikost $M_Z = 181,17$ Nm. Taktéž byla splněna tolerance (-15 až $+25\% M_Z$). Tolerance pro moment zvratu je $-10\% M_{ZV}$. Moment zvratu hybridního elektromotoru byl 214,56 Nm, u motoru s měděným rotorem hodnota dosáhla 239,99 Nm. Z toho vyplývá, že minimální velikost momentu zvratu pro hybridní elektromotor by měla být 215,991 Nm. Vzniklý rozdíl 1,431 Nm může být zapříčiněn rozdílným počtem rotorových drážek. Hybridní elektromotor jich má 36 a motor s měděným rotorem 40. Motory spadají do třídy oteplení F, což znamená, že oteplení nesmí překročit 80K a to bylo splněno. Poslední část tabulky udává jednotlivé ztráty v elektromotoru.

Nejnižších ztrát u obou případů je dosaženo při napájení dle ②. Z toho vyplývá, že nejvyšší účinnosti bylo dosaženo zde. Hodnota, která nevyhovuje tolerancím, je záběrný moment elektromotoru, nejnižší přípustná velikost je 151,487 Nm. Změřená velikost záběrného momentu je o 5,387 Nm menší. Výsledek této hodnoty může být zapříčiněn rozdílným počtem rotorových drážek, jak bylo řečeno výše.

Pro variantu napájení ③, vyhověly všechny měřené veličiny tolerancím dle normy.

4.2 Srovnání prototypů s hybridním elektromotorem

Pro upravené rotory byly provedeny jednotlivé zkoušky dle kapitoly 3. Protokoly o zkoušce jsou z důvodu jejich objemu umístěny v elektronické příloze. V této části budou porovnány základní naměřené hodnoty. Srovnání bude opět provedeno pro tři varianty napájení ①, ②, ③. Změřené hodnoty budou porovnány se změřenými hodnotami katalogového provedení elektromotoru s hybridním rotorem. Tyto hodnoty musí splnit tolerance, které jsou dány ČSN EN 60034 – 1 následovně:

- | | |
|-------------------|-------------------------------|
| • Napájecí napětí | $\pm 5\%$ |
| • Kmitočet | $\pm 2\%$ |
| • Účinnost | $-0,15 \cdot (1 - \eta)$ |
| • Účinník | $-\frac{1 - \cos \varphi}{6}$ |
| • Skluz | $\pm 20\%$ |
| • Záběrný proud | $+20\%$ |
| • Záběrný moment | $-15\% \text{ až } +25\%$ |
| • Moment zvratu | -10% |

4.2.1 Porovnání hodnot při 400V/50Hz/11kW

Tab. 4.2 Porovnávané hodnoty při napájení 400V/50Hz/11kW

Provedení rotoru		①					
		HYB	MOT_1	MOT_2	MOT_3	MOT_4	MOT_5
f	Hz	50,01	50,02	50,00	50,02	50,00	49,99
U	V	400,00	399,86	400,55	400,95	400,20	400,51
P ₁	W	11959,0	11988,0	11971,0	12089,0	12032,0	12053,0
P ₂	W	10999,9	11002,6	10998,4	10986,0	11008,4	11002,5
I	A	20,62	20,60	20,52	20,79	20,83	20,81
n	min ⁻¹	1476,2	1477,0	1477,0	1474,8	1473,6	1471,7
η	%	92,13	92,24	92,47	91,70	92,16	91,67
cosφ	-	0,837	0,840	0,841	0,837	0,833	0,835
s	%	1,598	1,575	1,544	1,711	1,760	1,870
I _z	A	152,00	149,90	153,00	147,10	147,40	150,30
M _z	Nm	168,00	185,50	134,20 ³	129,80	128,40	130,90
M _{zv}	Nm	214,56	214,03	219,87	211,13	216,68	218,38
Δθ 30s	K	39,3	38,2	38,7	43,6	42,4	48,8
Δθ 0s	K	41,6	40,5	41,0	46,0	44,8	51,2
ΔP _{FE}	W	211,5	218,4	215,0	222,0	221,1	221,2
ΔP _s	W	383,0	384,6	381,6	395,7	396,6	406,3
ΔP _r	W	182,0	181,1	177,5	198,7	202,5	215,5
ΔP _{fw}	W	66,4	59,5	54,9	73,6	57,2	75,0
ΔP _{LL}	W	97,7	86,5	72,6	113,6	65,5	85,7
ΔP _T	W	940,6	930,1	901,6	1003,6	942,9	1003,7

V tabulce 4.2 jsou uvedeny změřené hodnoty při variantě napájení 400V/50Hz/11kW. Hodnota napájecího napětí splnila požadovanou toleranci dle normy. Taktéž frekvence vyhověla tolerančnímu pásmu. Účinnost všech prototypů vyhověla minimální hodnotě dané tolerancí, taktéž splnila normativní hodnotu pro IE3, která je dána normou na 91,4%. Nejvyšší účinnosti bylo dosaženo u prototypu MOT_2 a to 92,47%. Nejvyšší účinek byl také naměřen u tohoto prototypu. Ten dosáhl velikosti 0,841 a splnil toleranci. U ostatních prototypů účinek též vyhověl. Tolerance skluzu je poměrně vysoká, a tak této podmínce vyhověly všechny elektromotory. Velikost záběrného proudu je omezena normou na +20%. Takové hodnoty žádný z měřených prototypů nedosáhl. U MOT_2 byla velikost záběrného proudu hybridu překročena o 1A. U ostatních provedení byly naměřeny hodnoty nižší.

Záběrný moment by se měl pohybovat v rozmezí -15% až +25%. Tuhle podmínku splnil pouze prototyp MOT_1. V ostatních případech byl nižší než požadovaný. Dolní hranice záběrného momentu by měla být nejméně 142,8 Nm. Moment zvratu vyhověl u všech variant a lišil se od katalogového elektromotoru pouze v jednotkách Nm. Další srovnávanou veličinou

³ Červené hodnoty nesplňují tolerance

bylo oteplení, které nesmí dle normy překročit dovolené oteplení izolačního systému. Tuhle podmínku splnily všechny prototypy. V poslední části tabulky jsou uvedeny ztráty. Nejvyšší ztráty v železe byly naměřeny u MOT_3 a to 222W. Ve vinutí statoru a rotoru byly nejvyšší ztráty u prototypu MOT_5. Taktéž ztráty mechanické byly nejvyšší u tohoto provedení. Nejvyšších rozptylových ztrát dosáhlo provedení MOT_3. Hladině hluku a vibrací vyhověly všechny varianty. Prototyp MOT_1 jako jediný splnil všechny hodnoty dané tolerancemi. Proto by při napájení ① mohl být použit jako náhrada za katalogový hybridní elektromotor.

4.2.2 Porovnání hodnot při 400V/60Hz/11kW

Tab. 4.3 Porovnávané hodnoty při napájení 460V/60Hz/11kW

Provedení rotoru		②					
		HYB	MOT_1	MOT_2	MOT_3	MOT_4	MOT_5
f	Hz	60,01	60,01	60,00	60,00	60,00	60,01
U	V	460,25	460,58	460,59	460,16	460,49	460,46
P ₁	W	11927,0	11913,0	11881,0	11970,0	11925,7	11974,9
P ₂	W	10993,0	11007,6	11007,1	10957,8	11007,7	11003,4
I	A	18,06	17,97	17,84	18,10	18,20	18,13
n	min ⁻¹	1779,6	1779,8	1780,1	1778,2	1777,4	1776,2
η	%	92,75	93,07	92,85	92,27	92,47	92,55
cosφ	-	0,829	0,831	0,835	0,830	0,821	0,828
s	%	1,142	1,132	1,108	1,212	1,255	1,333
I _Z	A	149,80	147,40	150,10	150,20	148,10	152,40
M _Z	Nm	146,10	180,80	129,50	189,10	165,80	135,80
M _{ZV}	Nm	205,24	201,19	204,65	198,09	207,54	203,92
Δθ 30s	K	32,2	30,0	31,0	34,4	31,8	36,2
Δθ 0s	K	34,0	31,9	32,8	36,2	33,6	38,0
ΔP _{FE}	W	246,6	244,2	261,6	258,7	268,4	246,2
ΔP _s	W	285,7	284,2	280,8	290,6	291,5	295,6
ΔP _r	W	129,8	130,0	127,1	140,3	144,0	154,8
ΔP _{fw}	W	108,6	94,5	102,0	156,9	90,3	124,2
ΔP _{LL}	W	94,3	72,1	78,0	78,7	103,6	71,7
ΔP _T	W	865,0	825,0	849,5	925,2	897,8	892,5

V tabulce 4.3 jsou uvedeny změřené hodnoty při variantě napájení 460V/60Hz/11kW. Hodnota napájecího napětí splnila požadovanou toleranci dle normy. Taktéž frekvence vyhověla tolerančnímu pásmu. Účinnost všech prototypů vyhověla minimální hodnotě, která je dána tolerancí. Všechny prototypy až na MOT_3 splnily normativní hodnotu pro IE3, která odpovídá 92,4%. Nejvyšší účinnosti bylo dosaženo u prototypu MOT_1 a to 93,07%. Nejvyšší účinník 0,835 byl u provedení MOT_2 a stejně jako u ostatních provedení splnil toleranci. Toleranci ±20% skluzu vyhověly všechny prototypy. Vyšších hodnot záběrného proudu bylo dosaženo u

provedení MOT_2, MOT_3 a MOT_5. Zvýšení není nijak razantní a splňuje danou toleranci pro záběrný proud.

Pro napájení ② by se taktéž záběrný moment měl pohybovat v rozmezí -15% až $+25\%$. Tuhle podmínku nesplnil pouze prototyp MOT_3. Ten dosáhl 189,10 Nm, čímž překročil horní hranici $+25\%$. V ostatních případech se pohyboval v tolerančním pásmu. U všech provedení vyhověl také moment zvratu. Vyšší hodnoty bylo dosaženo pouze v případě MOT_4. Srovnávanou veličinou bylo také oteplení, které nesmí dle normy překročit dovolené oteplení izolačního systému. Tuhle podmínku splnily všechny prototypy a dosahovaly nižších hodnot než při napájení ①. V poslední části tabulky jsou opět uvedeny ztráty. Nejnižší ztráty v železe byly naměřeny u MOT_1 a to 244,2W. Ve vinutí statoru a rotoru byly nejnižší ztráty u prototypu MOT_2. Nejmenší hodnota mechanických ztrát byla naměřena u provedení MOT_4. Nejnižších rozptylových ztrát dosáhlo provedení MOT_5. Hladině hluku a vibrací vyhověly všechny varianty. Prototyp MOT_3 jako jediný nesplnil všechny hodnoty dané tolerancemi. Pro tento typ napájení by připadalo v úvahu, jako náhrada katalogového provedení, použití elektromotorů s rotory upravenými jako u MOT_1, MOT_2, MOT_4 a MOT_5.

4.2.3 Porovnání hodnot při 400V/60Hz/12,6kW

Tab. 4.4 Porovnávané hodnoty při napájení 460V/60Hz/12,6kW

Provedení rotoru		③					
		HYB	MOT_1	MOT_2	MOT_3	MOT_4	MOT_5
f	Hz	60,00	60,01	60,01	60,10	59,99	60,01
U	V	460,25	460,11	460,23	460,32	460,60	460,25
P ₁	W	13631,0	13629,0	13676,0	13663,0	13691,0	13731,0
P ₂	W	12598,6	12602,3	12604,6	12634,2	12603,3	12595,7
I	A	20,23	20,17	20,19	20,32	20,38	20,43
n	min ⁻¹	1775,0	1775,8	1776,0	1776,2	1772,9	1771,4
η	%	92,59	92,71	92,63	91,84	92,46	92,21
cosφ	-	0,845	0,848	0,850	0,843	0,842	0,843
s	%	1,392	1,361	1,350	1,478	1,497	1,608
I _z	A	150,40	147,40	150,10	150,20	148,10	152,40
M _z	Nm	164,60	180,80	129,50	189,10	165,80	135,80
M _{ZV}	Nm	201,37	201,19	204,65	198,09	207,54	203,92
Δθ 30s	K	38,4	36,9	38,1	41,9	38,9	44,7
Δθ 0s	K	40,9	39,1	40,3	44,2	41,2	46,9
ΔP _{FE}	W	261,6	242,5	260,1	257,5	264,2	243,8
ΔP _s	W	367,8	367,2	368,9	376,0	375,0	386,4
ΔP _r	W	181,3	179,3	178,1	194,9	197,7	213,3
ΔP _{fw}	W	95,4	94,5	102,0	156,9	90,3	124,2
ΔP _{LL}	W	103,9	110,3	98,6	129,2	104,9	102,5
ΔP _T	W	1010,0	993,8	1007,7	1114,5	1032,1	1070,2

V tabulce 4.4 jsou uvedeny změřené hodnoty při variantě napájení 460V/60Hz/12,6kW. Hodnota napájecího napětí splnila požadovanou toleranci dle normy. Taktéž frekvence vyhověla tolerančnímu pásmu. Účinnost všech prototypů vyhověla minimální hodnotě, která je dána tolerancí. Všechny prototypy až na MOT_3 a MOT_5 splnily normativní hodnotu pro IE3, která odpovídá 92,4%. Nejvyšší účinnosti bylo dosaženo u prototypu MOT_1 a to 92,71%. Nejvyšší účinník 0,850 byl u provedení MOT_2 a stejně jako u ostatních provedení splnil toleranci. Toleranci $\pm 20\%$ skluzu vyhověly všechny prototypy. Nejvyšší hodnota záběrného proudu byla dosažena u provedení MOT_5. Zvýšení není nijak razantní a splňuje danou toleranci pro záběrný proud.

Pro napájení ③ by se taktéž záběrný moment měl pohybovat v rozmezí -15% až $+25\%$. Tuhle podmínku nesplnily prototypy MOT_2 a MOT_5. Záběrné momenty těchto provedení nesplnily spodní hranici tolerance, která odpovídá hodnotě 139,91Nm. V ostatních případech se záběrný moment pohyboval v tolerančním pásmu. U všech provedení vyhověl toleranci také moment zvratu, ten se takřka neměnil. Srovnávanou veličinou bylo také oteplení, které nesmí dle normy překročit dovolené oteplení izolačního systému. Tuhle podmínku splnily všechny prototypy a dosahovaly taktéž nižších hodnot než při napájení ①. V poslední části tabulky jsou opět uvedeny ztráty. Nejnížší ztráty v železe byly opět naměřeny u MOT_1 a to 242,5W. Ztráty ve vinutí statoru byly nejnižší u provedení MOT_1. Provedení MOT_2 mělo nejnižší ztráty ve vinutí rotoru. Nejmenší hodnota mechanických ztrát byla naměřena u provedení MOT_4. Nejnížších rozptylových ztrát dosáhlo provedení MOT_2. Hladině hluku a vibrací vyhověly všechny varianty. Prototyp MOT_2 a MOT_5 nesplnily všechny hodnoty dané tolerancemi. Pro tento typ napájení by připadalo v úvahu, jako náhrada katalogového provedení, použití elektromotorů s rotory upravenými jako u MOT_1, MOT_3 a MOT_4.

4.2.4 Shrnutí získaných poznatků

Pro napájení ① by se jako jediná varianta náhrady dal využít elektromotor s upraveným hybridním rotorem podle provedení MOT_1.

Při napájení ② by se jako možné varianty náhrady dali použít upravené rotory podle MOT_1, MOT_2, MOT_4 a MOT_5.

Pro napájení ③ by takovéto nahrazení mohlo být provedeno upravenými rotory podle MOT_1, MOT_3, MOT_4.

Jelikož motor má být schopen pracovat pro všechny tři typy napájení, tak jako jediná použitelná varianta je upravený rotor podle MOT_1. Ten při všech napájeních splnil toleranční meze dané normou ČSN EN 60034 – 1. U tohoto provedení se také potvrdila teorie o zvýšení záběrného momentu při sníženém záběrném proudu podle kapitoly 2. Také dosahoval při 60Hz nejnižších celkových ztrát a nejvyšší účinnosti. Při všech variantách napájení měl nejnižší oteplení. Hodnoty záběrného proudu, momentu a momentu zvratu dosahují lepších hodnot než katalogový elektromotor s hybridním rotorem. Tato varianta by se dala použít jako náhrada stávajícího provedení katalogového elektromotoru.

5 Závěr

Cílem práce bylo ověření parametrů asynchronního elektromotoru s hybridním rotorem. V rámci diplomové práce bylo navrženo několik úprav hybridního rotoru. Z těch bylo vybráno pět provedení, která byla následně vyrobena. V této práci jsou tyto prototypy označovány jako MOT_1 až 5. Všechny potřebné zkoušky a práce probíhaly ve firmě Siemens, s.r.o., odštěpný závod Elektromotory Mohelnice.

Byly provedeny typové zkoušky asynchronního elektromotoru s katalogovým hybridním rotorem při různých variantách napájení. Výsledky byly porovnány se změřenými hodnotami asynchronního elektromotoru s měděným rotorem. Některé hodnoty nevyhověly tolerancím dle ČSN EN 60034 – 1. To mohlo být způsobeno rozdílnou vnitřní konstrukcí rotoru. Měděný rotor má po obvodu vyraženo 40 drážek. Oproti tomu hybridní rotor obsahuje drážek 36.

Další typové zkoušky byly provedeny pro každý upravený rotor. Tyto změřené hodnoty byly porovnány s naměřenými hodnotami elektromotoru s neupraveným hybridním rotorem. Jediným parametrem, který nevyhovoval, byla velikost záběrného momentu. Ten se nepodařilo splnit pro upravené rotory ve čtyřech případech. A to u prototypů MOT_2, MOT_3, MOT_4 a MOT_5. Jeho zvýšení by se mohlo dosáhnout použitím jiného materiálu na druhou klec. Místo hliníku by se použila některá z jeho slitin, např. silumin. Je otázkou, zda by při tomto opatření vyhověly tolerancím i ostatní měřené veličiny.

Úpravy provedené na hybridním rotoru, které jsou v práci označovány jako MOT_1, vyhověly všem tolerancím. Tato úprava rotoru by se dala použít jako náhrada stávajícího provedení hybridního elektromotoru nebo jako nové provedení. U tohoto prototypu došlo ke snížení záběrného proudu a navýšení záběrného momentu. Záběrný moment narostl přibližně o 20 Nm. Také účinnost tohoto provedení narostla a pohybuje se nad hranicí normativní hodnoty účinnosti, kterou udává norma. Účinnost při 50 Hz dosáhla 92,24%. Při 60Hz byla u prvního měření vypočtena na 93,07% a 92,71% u druhého.

6 Seznam použité literatury

- [1] KAČOR, Petr. *Vybrané typy elektrických strojů*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010, 127 s. ISBN 978-80-248-2169-6.
- [2] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2002, 135 s. ISBN 80-248-0025-x.
- [3] KOPYLOV, Igor Petrovič a Petr VOŽENÍLEK. *Stavba elektrických strojů*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988, 685 s.
- [4] BRÁZDA, M a R STAŇA. *Výpočet asynchronního motoru*. Brno: Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, 1973, 222 s.
- [5] Materiály poskytnuté firmou Siemens, s.r.o., odštěpný závod Elektromotory Mohelnice
- [6] ŠKOP, František. *Komplexní zkoušky nízkonapětových asynchronních elektromotorů* [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2015-04-09]. 79 s. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/104763>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Fakulta strojní. Vedoucí práce Jana Petru.
- [7] Asynchronní stroje. In: *SPŠel.it Dobruška* [online]. 2008 [cit. 2015-04-09]. Dostupné z: http://spselitdobruska.cz/wp-content/uploads/2014/10/ESP/asynchronni_stroje.pdf
- [8] GOLD, Michal. *Měření na asynchronním stroji, laboratorní úloha*. [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2015-04-09]. 48 s. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/103726>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Petr Bernat.
- [9] BAŠTA, Jan, Vojtěch KULDA a Jiří MĚŘIČKA. *Měření na elektrických strojích*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959, 302 s.
- [10] ČSN EN ISO 3745. *Akustika - Určování hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové místnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [11] ČSN 35 0010. *Točivé elektrické stroje: Zkoušky*. Praha: Vydavatelství norem, 1992.
- [12] ČSN EN 60034-14. *Točivé elektrické stroje - Část 14: Mechanické vibrace určitých strojů s výškou osy od 56 mm - Měření, hodnocení a mezní hodnoty mohutnosti vibrací*. Praha: Český normalizační institut, 2004.

- [13] ČSN EN 60034 – 2 – 1. *Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek s výjimkou strojů pro trakční vozidla*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

7 Seznam obrázků a tabulek

obr. 1.1 Konstrukce dvoufázového asynchronního motoru podle N. Tesly	2
obr. 1.2 Základní konstrukční části asynchronního stroje.....	3
obr. 1.3 a) kuličkové ložisko normálního provedení, vpravo ložiskový štít	5
obr. 1.4 a) příklad statorového plechu b) statorový svazek stažený pásky plechu	6
obr. 1.5 a) příklad statorového plechu b) rotorový svazek	7
obr. 1.6 Příklad provedení vsypávaného vinutí.....	8
obr. 1.7 Vinutí z polotuhých cívek.....	9
obr. 1.8 Schematické znázornění tyčového vinutí, a) vlnového, b) smyčkového.....	9
obr. 1.9 Schematické uspořádání Roebelovy tyče a) ohnutí jednoho pásu, b), c) složené poloviny tyče, d) složená Roebelova tyč.	10
obr. 1.10 Kotva nakrátko s a) odlévaným vinutím, b) s natvrdo pájeným vinutím, c) kruh nakrátko s lopatkami	11
obr. 1.11 Tvary rotorových drážek asynchronních motorů.....	12
obr. 1.12 Provedení kruhů nakrátko rotorových vinutí asynchronních motorů, a) odlévané vinutí dvouklecové, b) pájené vinutí dvouklecové	12
obr. 1.13 Rotorové vinutí s asynchronního motoru s kroužky	13
obr. 1.14 Elektrické zapojení vinutí asynchronního motoru	14
obr. 1.15 Zapojení svorkovnice asynchronního motoru	15
obr. 1.16 Rozložení mmn po obvodu statoru při jedné dvojici pólů. Obvod vyjádřen v rozvinutém tvaru	17
obr. 1.17 Symetrický třífázový systém	18
obr. 1.18 Smysl otáčení vektorů magnetomotorického napětí statoru a rotoru	20
obr. 1.19 Fázorový diagram a) ideální chod naprázdno, b) skutečný stav naprázdno	23
obr. 1.20 Pracovní stavy asynchronního stroje	24
obr. 1.21 Energetická bilance asynchronního motoru	25
obr. 1.22 Průběh momentu asynchronního stroje v závislosti na skluzu	26
obr. 1.23 Změna záběrného momentu asynchronního motoru se zvyšujícím se odporem kotvy	27
obr. 1.24 Momentová charakteristika asynchronního stroje	28
obr. 2.1 Srovnání účinností EFF a IE	30
obr. 2.2 Rozsah účinností motorů IE a předchozí EFF	30
obr. 2.3 Řez dvojistou klecí rotoru a) první klec z mědi, b) druhá klec odlitá z hliníku	31

obr. 2.4 Výsledná momentová charakteristika	32
obr. 2.5 Upravená měděná tyč MOT_1, s galvanicky nanesenou vrstvou cínu	33
obr. 2.6 Upravená měděná tyč MOT_2, s galvanicky nanesenou vrstvou cínu	33
obr. 2.7 Odlitý rotor, provedení MOT_3	34
obr. 2.8 Odlitý rotor, provedení MOT_3	34
obr. 3.1 Místa měření a) stator, b) rotor	36
obr. 3.2 Charakteristika poklesu odporu vinutí po oteplovací zkoušce	39
obr. 3.3 Charakteristika měření naprázdno s extrapolací mechanických ztrát	42
obr. 3.4 Spojení elektromotoru s dynamometrem	44
obr. 3.5 Měřicí stanoviště	44
obr. 3.6 Charakteristika měření nakrátko s extrapolovanými průběhy	45
obr. 3.7 Zatěžovací charakteristika při konstantním napětí	48
obr. 3.8 Zatěžovací charakteristika při konstantním momentu	49
obr. 3.9 Ořezaná momentová charakteristika	54
obr. 3.10 Momentová charakteristika	55
obr. 3.11 a) termočlánky umístěné ve statorovém vinutí, b) vyvedení termočlánků z motoru	56
obr. 3.12 Grafické znázornění růstu teploty pomocí časových konstant	57
obr. 3.13 Grafický záznam oteplovací zkoušky	58
obr. 3.14 Umístění měřeného motoru a měřících zařízení při určování hladin akustického výkonu	59
obr. 3.15 Měření hluku bez zátěže, motor umístěn na pružné podložce	62
obr. 3.16 Měření hluku se zátěží, motor umístěn na pevné podložce	62
obr. 3.17 Grafické vyhodnocení měření hluku bez zátěže	63
obr. 3.18 Grafické vyhodnocení měření hluku se zátěží	64
obr. 3.19 Vyznačená místa k měření vibrací	65
obr. 3.20 Osciloskopický záznam vibrací v programu eProTeam	66
Tab. 3.1 Štítkové hodnoty jednotlivých elektromotorů	35
Tab. 3.2 Štítkové hodnoty MOT_3	35
Tab. 3.3 Mechanická kontrola statoru	36
Tab. 3.4 Mechanická kontrola rotoru	37
Tab. 3.5 Odpor vinutí – za studena	38
Tab. 3.6 Odpor vinutí při teplotě okolí 21,64°C	38

Tab. 3.7 Časy záběhu motoru dle výkonu	40
Tab. 3.8 Měření naprázdno s naměřenými a <i>vypočtenými</i> hodnotami	41
Tab. 3.9 Měření nakrátko, část 1	43
Tab. 3.10 Měření nakrátko, část 2	44
Tab. 3.11 Zatěžovací charakteristiky s naměřenými a <i>vypočtenými</i> hodnotami, konstantní napětí část 1.	46
Tab. 3.12 Zatěžovací charakteristiky s naměřenými a <i>vypočtenými</i> hodnotami, konstantní napětí část 2.	47
Tab. 3.13 Zatěžovací charakteristiky s naměřenými a <i>vypočtenými</i> hodnotami dle IEC, konstantní napětí	47
Tab. 3.14 Zatěžovací charakteristiky s naměřenými a <i>vypočtenými</i> hodnotami, konstantní moment část 1.	47
Tab. 3.15 Zatěžovací charakteristiky s naměřenými a <i>vypočtenými</i> hodnotami, konstantní moment část 2.	47
Tab. 3.16 Ořezaná momentová charakteristika pro $U = 291 \text{ V}$	51
Tab. 3.17 Ořezaná momentová charakteristika pro $U = 260 \text{ V}$	52
Tab. 3.18 Ořezaná momentová charakteristika $U = 230 \text{ V}$	52
Tab. 3.19 Momenty pro $U = 291, 260, 230 \text{ V}$	52
Tab. 3.20 Extrapolace pro $U_n = 400 \text{ V}$	52
Tab. 3.21 Jednotlivé odhadované body momentové charakteristiky	53
Tab. 3.22 Moment pro $U = 239, 278, 318 \text{ V}$	53
Tab. 3.23 Extrapolace momentu zvratu pro $U_n = 400 \text{ V}$	53
Tab. 3.24 Změřené hodnoty v ustáleném stavu	57
Tab. 3.25 Provozní podmínky při měření hluku	60
Tab. 3.26 Výsledky měření hluku	61
Tab. 3.27 Celkové výsledky měření hluku bez zátěže	61
Tab. 3.28 Celkové výsledky měření hluku se zátěží	62
Tab. 3.29 Měření vibrací, pružné uložení	66
Tab. 3.30 Měření vibrací, pevné uložení	66
Tab. 3.31 Shrnutí dle IEC 60034-2-1:2007, ČSN EN 60034-2-1:2008	67
Tab. 3.32 Shrnutí dle IEEE112:2004	67
Tab. 3.33 Shrnutí dle CSA C390:2010	68
Tab. 3.34 Měřicí přístroje, část 1.	68
Tab. 3.35 Měřicí přístroje, část 2.	68

Tab. 4.1 Porovnání měřených hodnot elektromotoru s měděným a hybridním rotorem.....	69
Tab. 4.2 Porovnávané hodnoty při napájení 400V/50Hz/11kW.....	71
Tab. 4.3 Porovnávané hodnoty při napájení 460V/60Hz/11kW.....	72
Tab. 4.4 Porovnávané hodnoty při napájení 460V/60Hz/12,6kW	73

8 Seznam příloh

8.1 Tištěné

Název:	Počet stran
Protokol pro MOT_3 při 50Hz	27
Upravená tyč pro MOT_1	1
Upravená tyč pro MOT_2	1
Umístění měděných tyčí v drážkách pro MOT_3	1
Umístění měděných tyčí v drážkách pro MOT_4	1
Umístění měděných tyčí v drážkách pro MOT_5	1
Simulace rozložení magnetické indukce v asynchronním elektromotoru s upraveným hybridním rotorem a s měděným rotorem	4

8.2 Elektronické

Protokol pro elektromotor s měděným rotorem
Protokol pro elektromotor s hybridním rotorem při 50Hz
Protokol pro elektromotor s hybridním rotorem při 60Hz
Protokol pro elektromotor s hybridním rotorem při 60Hz, 12.6kW
Protokol pro MOT_1 při 50Hz
Protokol pro MOT_1 při 60Hz
Protokol pro MOT_1 při 60Hz, 12.6kW
Protokol pro MOT_2 při 50Hz
Protokol pro MOT_2 při 60Hz
Protokol pro MOT_2 při 60Hz, 12.6kW
Protokol pro MOT_3 při 50Hz
Protokol pro MOT_3 při 60Hz
Protokol pro MOT_3 při 60Hz, 12.6kW
Protokol pro MOT_4 při 50Hz
Protokol pro MOT_4 při 60Hz
Protokol pro MOT_4 při 60Hz, 12.6kW

Protokol pro MOT_5 při 50Hz

Protokol pro MOT_5 při 60Hz

Protokol pro MOT_5 při 60Hz, 12.6kW